Д-ръ Адольфъ Томеленъ
ИНЖЕНЕРЪ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ТЕОРЕТИЧЕСКІЙ И ПРАКТИЧЕСКІЙ КУРСЪ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ПЕРЕВОДЪ СЪ ЧЕТВЕРТАГО ИСПРАВЛЕННАГО И ВНОВЬ ДОПОЛНЕННАГО НѢМЕЦКАГО ИЗДАНІЯ

Инж.-технолога Д. М. ВЕРЖБИНСКАГО

ПОДЪ РЕДАКЦІЕЙ

П. Д. ВОЙНАРОВСКАГО

ПРОФЕССОРА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАГО ИНСТИТУТА ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА III



С.-ПЕТЕРБУРГЪ
ИЗДАНІЕ А. С. СУВОРИНА
1911



Типографія А. С. Суворина. Эртелевъ, 13

ОГЛАВЛЕНІЕ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

ГЛАВА ДВѢНАДЦАТАЯ.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ.

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ.

ОБОЗНАЧЕНІЯ.

Величины, измѣренныя въ абсолютныхъ единицахъ, напечатаны жирнымъ шрифтомъ. Приведенныя страницы указываютъ, въ какомъ мѣстѣ данное обозначеніе въ первый разъ было принято.

a якорь,
a машина-двигатель,
b батарея,
c емкость,
d прямые витки,
d успокоеніе,
d трехфазный токъ,
e одноякорный.
g гальванометръ,
g реакція якоря,
i внутреннее,
j замыкающая часть,
k коммутированіе,
k напряженіе у зажимовъ,
l провода, *l* воздухъ,
m магниты,
μ намагничиваніе,
n полезная величина,
p полюсъ,
q поперечное намагничиваніе,
r послѣдовательное соединеніе,
r треніе, *r* вращеніе,
s разсѣяніе (утечка),
s самоиндукція,
st индукція отъ разсѣянія,
v потеря,
w валъ,
w токи Фуко,
w машина перемѣннаго тока,
x абсцисса или горизонтальный,
y ордината или вертикальный,
z отвѣтвленіе,
z зубцы,
max наивысшее значеніе,
mittel среднее значеніе,
o холостой ходъ, короткое замыканіе кромѣ стр. 287 и стр. 299.
1 и 2 первичный и вторичный,
1 и 2 сопутствующій и встрѣчно направленый,
1 и 2 набѣгающій и сбѣгающій,

Малый латинскій алфавитъ.

		СТРАН.
a	Атомный вѣсъ	39
a	Ускореніе	126
a	Половинное число вѣтвей тока.	162
a	Наибольшее ускореніе въ *m/sec*².	436
a	Число каналовъ на индуктирующую сторону катушки	506
b	Длина якоря	96
b	Проводимость безваттнаго тока.	609
c	Различные коэффиціенты.	
c	Постоянный токъ въ одной вѣтви якоря	592
$c = \frac{\xi_2}{\xi_1}$		557
e	Напряженіе у зажимовъ въ вольтахъ	8
e	Напряженіе въ сѣти въ вольтахъ	472
e_1	Напряженіе одной фазы	472
f	Сила въ динахъ	58
f	Коэффиціентъ тяги въ килогр. для одной тонны	288
g	Проводимость ваттнаго тока	609
h	Горизонтальная составляющая.	86
i	Сила тока въ амперахъ	3
i	Дѣйствующая сила тока	308
i	токъ въ сѣти	472
i_1	Токъ одной фазы	472
k	Валентность.	39
$k = 3\frac{\delta}{\pi} - 4\frac{\delta^3}{\pi^3}$		563
k	Различные коэффиціенты.	
$k' = \frac{3}{\pi}\left(1 - 4\frac{\delta^2}{\pi^2}\right)$		565
l	Длина въ метрахъ	11
l	» » сантиметрахъ	78
m	Вѣсъ въ миллиграммахъ	39
m	Масса въ техническихъ единицахъ	436
m	Масса въ астрономическихъ единицахъ	127
$m = i_0 + r$		527
m	Магнитная масса	58
n	Число оборотовъ въ минуту	144
p	Число паръ полюсовъ	152
p	Абсцисса центра	528
q	Поперечное сѣченіе въ кв. миллиметрахъ	11
q	Ордината центра	528
q'	Число проволокъ у индуктирующейся стороны катушки	488
r	Разстояніе въ сантиметрахъ	58
r	Радіусъ въ метрахъ	289
$r = i_0/2\tau$		527
s	Длина пути въ сантиметрахъ	78
s	Число мѣстъ	157
s	Подъемъ въ тысячныхъ	288
s	Наибольшее опереженіе въ метрахъ	436
$s^2 = m^2 - r^2$		527
$\mathbf{t}_1$	Глубина канала	219
$\mathbf{t}_2$	Ширина канала	219
t	Время въ сек.	3
$\mathbf{t}_1$	Продолжительность одного періода	300
u	Отношеніе первичныхъ витковъ къ вторичнымъ	577
v	Отношеніе числа оборотовъ къ синхронному числу оботоровъ	565
v	Скорость	78
v	Наибольшая допускаемая скорость	436
w	Сопротивленіе въ омахъ	11
$w' = (1 + 2\tau)w_1$		532
$w'' = (1 + \tau_1)^2 \cdot \frac{z_1{}^2}{z_2{}^2} \cdot w_2$		520
x	Реакція цѣпи	603
x	абсциссы.	
y	Ординаты.	
y	Шагъ обмотки	148
y	Кажущаяся проводимость	609
z	Полное число витковъ	144
$z = \sqrt{w_a{}^2 + L\omega^2}$		416
$z = L\omega$		563
$z^2 = e_1{}^2 + s^2 \cdot w_1{}^2$		527
z'	Число проводниковъ одной фазы	299
~	Число періодовъ въ одну секунду	115
~	Число періодовъ скольженія.	480

Большой латинскій алфавитъ.

		СТРАН.
A	Работа въ эргахъ	81
A	Работа въ джоуляхъ	27
B	Индукція	89
C	Емкость въ фарадахъ	136
D	Діаметръ якоря	96
D	Выравнивающая сила	438
E	Электродвижущая сила въ абсолютныхъ единицахъ	77
E	Электродвижущая сила въ вольтахъ	6
E_1	электродвижущая сила = напряженію при холостомъ ходѣ	392
E_1	Самоиндукція статора	518
E_{12}	Индукція со стороны статора на роторъ	519
E_2	Самоиндукція ротора	519
E_{21}	Индукція со стороны ротора на статоръ	518
F	Сила въ килогр.	118
G	Вѣсъ въ граммахъ	27
G	Вѣсъ въ килогр.	115
G	Вѣсъ въ тоннахъ	288
H	Напряженіе поля	63
J	Сила тока въ амперахъ	104
J	Сила тока въ абсолютныхъ единицахъ	81
K	Скорость вагона въ клм/часъ	289
L	Коэффиціентъ самоиндукціи въ Генри	102
L	Коэффиціентъ самоиндукціи въ статорѣ, не имѣющемъ разсѣянія	563
M	Масса въ граммахъ	127
M	Коэффиціентъ взаимной индукціи	110
M	Наибольшій добавочный вращающій моментъ	437

страи.

M_d Вращающій моментъ въ килограммометрахъ 85
$\boldsymbol{N}$ Силовыя линіи, силовой потокъ. 64
$\boldsymbol{N}$ Силовыя линіи въ роторѣ . . 492
$\boldsymbol{N}_o$ Силовыя линіи въ статорѣ. . 493
P Мощность въ ваттахъ. 28
P Механическая мощность въ ваттахъ. 263
P средняя мощность 307
P мгновенная мощность. 306
P Полезная мощность генератора. 418
P_1 Полная сообщенная мощность. 415
P_2 Мощность, переданная ротору . 500
$\boldsymbol{Q}$ Площадь въ кв. сантиметрахъ. 64
Q_w Количество теплоты въ малыхъ калоріяхъ 26
Q Количество электричества въ кулонахъ. 3
R Радіусъ 528
S Число каналовъ. 169
T Температура 12
$\boldsymbol{T}$ Продолжитель короткаго замыканія. 103
$\boldsymbol{V}$ Объемъ въ куб. сантиметрахъ. 114
W Полное сопротивленіе. 6
W Переходное сопротивленіе (контакта) щетокъ 201
W_2 Вторичное внѣшнее сопротивленіе 366
$\boldsymbol{W}$ Магнитное сопротивленіе. . . 191
$\boldsymbol{W}$ Сопротивленіе воздушнаго слоя. 412
X Ампервитки 93
Y Шагъ обмотки 169
Y Кажущаяся проводимость. . . 609
Z Кажущееся сопротивленіе . . . 604

Греческій алфавитъ.

α Уголъ нейтральнаго пояса. . . 194
$\alpha = arctg\ (w_a + w_d)$ 228
$\alpha = arctg\ w_a / L\omega$ 416
α Уголъ между осями обмотокъ . 561
β Уголъ обхвата полюсомъ. . . . 96
β Уголъ обхвата полюсомъ въ электрическихъ единицахъ. . . . 384

страи.

β Уголъ между $\boldsymbol{N}_o$ и $\boldsymbol{N}$ 520
γ Половина ширины индуктирующейся стороны катушки. . . 382
γ Уголъ опереженія. 421
$\delta = 2\gamma + \beta - \pi$ 389
$\delta = \frac{\pi}{2} - \alpha$ 561
ε Основаніе натуральныхъ логариѳмовъ 105
ε Наибольшее равнодѣйствующее опереженіе 436
η Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія. 248
$\eta = i_{max} : c$ 588
η_h Коэффиціентъ гистерезиса . . 114
μ Проницаемость 89
ν Число каналовъ якоря. 587
ξ Число витковъ 77
ξ Число послѣдовательно соединенныхъ витковъ на одну пару полюсовъ. 561
ρ Удѣльное сопротивленіе 11
$\sigma = \boldsymbol{N}_m : \boldsymbol{N}$ 101
$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2$ 517
τ_1 Отношеніе сопротивленія воздушнаго пространства къ сопротивленію первичнаго поля разсѣянія. 516
τ_2 Отношеніе сопротивленія воздушнаго пространства къ сопротивленію вторичнаго поля разсѣянія. 516
φ Уголъ сдвига фазъ 326
φ_1 Уголъ между E_1 и i 328
ω Механич. угловая скорость . . 85
ω Электр. угловая скорость . . . 300
Δ_ρ Температурный коэффиціентъ . 12
Г Мощность преобразователя: мощность постояннаго тока . . . 594

Изъ предисловія автора къ первому изданію.

«Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik» представляетъ собою руководство среднее между популярнымъ и строго научнымъ трудомъ. Поэтому оно не только знакомитъ съ явленіями, имѣющими мѣсто въ электротехникѣ, но и старается выработать въ читателяхъ «электротехническое мышленіе», т. е. заставить вполнѣ проникнуться тѣми представленіями и воззрѣніями, при посредствѣ которыхъ объясняются явленія въ этой области. Наконецъ, этимъ трудомъ авторъ желаетъ предоставить читателямъ возможность розобрать и прослѣдить аналитически и графически дѣйствіе электрическихъ машинъ. Но при этомъ всѣ математическіе выводы сдѣланы наивозможно просто и изъ высшей математики затронуты только начала.

Для исполненія всего этого пришлось сравнительно отказаться отъ приведенія и описанія конструктивныхъ деталей. Сдѣлать это казалось возможнымъ потому, что въ литературѣ имѣется цѣлый рядъ выдающихся трудовъ чисто описательнаго и конструктивнаго характера.

Ад. Томеленъ.

Altenburg.
Май 1903.

Предисловіе къ четвертому нѣмецкому изданію.

Въ четвертое изданіе даннаго курса внесенъ рядъ дополненій, а также и существенныхъ измѣненій въ способѣ изложенія.

При переработкѣ главы объ электромагнетизмѣ законъ объ индукціи въ его самой общей формѣ положенъ въ основаніе изложенія и процессы преобразованія энергіи оттѣнены болѣе рельефно. Зависимость отъ времени возникающаго и исчезающаго магнитнаго потока, а также разсмотрѣніе явленій при притяженіи электромагнитомъ впервые приведены въ этой главѣ.

Въ статьѣ о параллельной работѣ динамомашины съ батареей описаны машины Pirani, Rosenberg'a и Osnos'a.

Глава о векторахъ и ихъ діаграммахъ немного расширена для большаго пониманія второй части даннаго труда.

Глава о реакціонныхъ катушкахъ и трансформаторахъ расширена разсмотрѣніемъ схемы включенія Свинбурна, индукціоннаго регулятора, послѣдовательнаго трансформатора, дивизора, разсѣянія при обмоткахъ дисковой и цилиндрической, а также трансформатора для электрическихъ печей.

Статьи, трактующія о магнитномъ дѣйствіи тока въ якорѣ машинъ перемѣннаго тока, совершенно переработаны; при разсмотрѣніи разсѣянія якоря и реакціи этого послѣдняго приведены діаграммы Potier. Вліяніе первичнаго разсѣянія представлено въ болѣе простой формѣ.

Зависимость мощности синхроннаго генератора или двигателя отъ сдвига фазъ между электродвижущей силой и силой тока можно отсчитывать непосредственно на самой діаграммѣ. Статья объ автоматическомъ регулированіи напряженія и компаундированіи машинъ перемѣннаго тока въ этомъ изданіи приведена впервые.

Возникновеніе вращающагося поля разобрано при разсмотрѣніи барабана, а не кольца, и приведена схема Skott'a преобразованія двухфазнаго тока въ трехфазный. Діаграмма Heyland'a согласно методу Rogowskis'a выведена и для двигателя, находящагося въ работѣ.

Разсмотрѣны также скольженія, превышающія 100%, и работа трехфазнаго двигателя при пересинхронизмѣ. Выводы, касающіеся круговой діаграммы, значительно сокращены.

Работа однофазныхъ двигателей выяснена на основаніи теоріи вращающихся возбужденій (амперъ-витковъ), а также допущеній Görges'a о поперечномъ потокѣ.

Статья о двигателяхъ перемѣннаго тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ въ этомъ изданіи приведена впервые. При разсмотрѣніи репульсіонныхъ двигателей и двигателей Eichberg—Latour'a разсмотрѣны подробнѣе потоки и явленія въ короткозамкнутыхъ катушкахъ, работа при нагрузкѣ представлена кривыми. Репульсіонный двигатель, а также двигатель Latour'a разобраны съ двумя парами щетокъ. У двигателя Eichberg—Latour'a опредѣлено геометрическое мѣсто обратной величины тока короткаго замыканія.

Глава объ одноякорныхъ преобразователяхъ дополнена разсмотрѣніемъ способа регулированія напряженія при помощи реакціонной катушки и разрѣзныхъ полюсовъ, а также статьею о каскадныхъ преобразователяхъ.

Вслѣдствіе того, что въ этомъ изданіи устранено все уже утратившее нынѣ значеніе и упрощено во многихъ случаяхъ изложеніе, намъ удалось удержать объемъ этого курса въ прежнемъ размѣрѣ.

Ад. Томеленъ.

Schlachtensee, октябрь 1909.

Сочиненіе «Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik von Dr. Adolf Thomälen представляетъ собою несомнѣнно цѣнное руководство по электротехникѣ какъ по замыслу, такъ и по способу изложенія. Авторъ задался цѣлью изложить въ возможно простой формѣ основныя явленія изъ области электричества и магнетизма и дать объясненія свойствъ динамомашинъ, трансформаторовъ, электродвигателей и другихъ электромеханизмовъ въ такомъ видѣ, чтобы прежде всего у читателя создалась ясная и правильная, если такъ можно выразиться, физическая картина, которую онъ затѣмъ оживляетъ разборомъ количественной стороны и освѣщаетъ весьма удачно выбранными примѣрами. Для лицъ, желающихъ серьезно изучить электротехнику, т. е. желающихъ сначала научиться понимать эту науку, а затѣмъ приступить къ болѣе детальному изученію, эта книга не только полезна, а прямо необходима. Можно сдѣлать лишь одинъ маленькій упрекъ автору: въ нѣкоторыхъ мѣстахъ онъ слишкомъ лакониченъ, полагаясь, очевидно, на самостоятельное мышленіе читателя, что, конечно, слѣдуетъ признать прекраснымъ педагогическимъ пріемомъ, но при условіи соблюденія нѣкоторой мѣры, опредѣляемой кругомъ читателей.

Проф. П. Войнаровскій.

С.-Петербургъ, Январь 1908.

Выпускаемое нынѣ второе изданіе на русскомъ языкѣ является переводомъ съ 4-го нѣмецкаго изданія, значительно дополненнаго и переработаннаго по сравненію со вторымъ изданіемъ, благодаря чему трудъ Dr. Adolf Thomälen'a пріобрѣтаетъ несомнѣнно еще большую цѣнность.

Проф. П. Войнаровскій.

С.-Петербургъ. Декабрь 1910 г.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

1. Электрическій токъ.—2. Электродвижущая сила.—3. Законъ Ома.—4. Зависимость сопротивленія отъ матеріала, поперечнаго сѣченія, длины и температуры проводника. — 5. Правила Кирхгофа. — 6. Сопротивленіе и распредѣленіе тока въ замкнутой цѣпи. — 7. Параллельное и послѣдовательное соединенія элементовъ. — Мостикъ Уитстона.— 9. Компенсаціонный методъ измѣренія напряженія. — 10. Законъ Джоуля, электрическая работа и электрическая мощность.—11. Разность потенціаловъ.— 12. Потеря на тепло Джоуля.

---

1. Электрическій токъ.

Накаливаніе лампочки, работа электродвигателя, намагничиваніе желѣза въ электромагнитахъ, разложеніе жидкостей—все это приписывается нами дѣйствію электрическаго тока. Спрашивается, почему же именно электрическій токъ является причиною всѣхъ вышеуказанныхъ явленій?

Электричество, съ которымъ имѣютъ дѣло въ данномъ случаѣ, по природѣ своей сходно со статическимъ электричествомъ или электричествомъ отъ тренія. Потертая шелкомъ стеклянная палочка электризуется, т. е. притягиваетъ небольшія легкія тѣла. Подобно этому смоляная палочка, потертая шерстью, также электризуется, но ея электричество противоположно электричеству стеклянной палочки. Это обнаруживается въ томъ, что электричество, получающееся на стеклянной палочкѣ, нейтрализуется электричествомъ на смоляной палочкѣ. Поэтому электричество на стеклѣ принимаютъ за положительное, а электричество на смоляной палочкѣ за отрицательное. Нейтрализація между положительнымъ и отрицательнымъ электричествами происходитъ такимъ же образомъ, какъ между холо-

домъ и тепломъ, или между давленіемъ выше одной атмосферы и давленіемъ ниже одной атмосферы. Какъ вода стекаетъ съ высокаго уровня на болѣе низкій, или какъ теплота,— какъ мы предполагаемъ, — передается отъ горячаго тѣла холодному, такъ и электричество течетъ отъ болѣе высокаго—положительнаго уровня къ болѣе низкому—отрицательному. Это выравниваніе называютъ электрическимъ токомъ, причемъ въ принципѣ безразлично, происходитъ ли оно между зажимами гальваническаго элемента или динамо, или между двумя металлическими шарами, заряженными разноименными статическими электричествами.

Однако необходимо указать и на разницу между электричествомъ отъ тренія и электрическимъ токомъ, создаваемымъ гальваническимъ элементомъ или динамомашиною. Количество электричества, которое собирается въ лейденской банкѣ и которое разряжается затѣмъ при помощи искръ, чрезвычайно мало по сравненію съ тѣмъ количествомъ, которое за короткое время доставляется элементомъ Даніеля, или безконечно мало по сравненію съ количествомъ, протекающимъ за день по городской кабельной сѣти. Но напряженіе электричества отъ тренія, наоборотъ, значительно выше обычнаго напряженія у динамомашинъ. Это подтверждается тѣмъ, что электричество отъ тренія легко пробиваетъ воздухъ. Кромѣ того, нейтрализація у электричества отъ тренія происходитъ внезапно, тогда какъ при электрическомъ токѣ—непрерывно.

Мы будемъ исходить изъ предположенія, что при электрическомъ токѣ перемѣщается только положительное электричество. Тогда сила тока опредѣляется тѣмъ количествомъ электричества, которое протекаетъ въ секунду черезъ поперечное сѣченіе проводника. Для измѣренія этой силы тока пользуются электролитическимъ или магнитнымъ дѣйствіемъ тока. Такимъ образомъ, говорятъ, что одинъ токъ вдвое сильнѣе другого, когда первый въ одинаковое время выдѣляетъ изъ серебрянаго раствора вдвое больше серебра, чѣмъ второй, или когда при одинаковыхъ условіяхъ первый токъ производитъ на магнитную стрѣлку дѣйствіе вдвое большее, чѣмъ второй.

Вѣсъ количества вещества, выдѣленнаго токомъ при электролизѣ, можетъ быть опредѣленъ болѣе точно, чѣмъ развиваемая тѣмъ же токомъ магнитная сила. Поэтому въ существующихъ законоположеніяхъ опредѣленіе единицы силы тока основывается на электролитическомъ дѣйствіи тока. Согласно этому единицей силы тока признается сила тока, которая выдѣляетъ изъ серебрянаго раствора 1,118 млг. серебра въ секунду. Такая сила тока называется амперомъ.

На практикѣ для измѣреній силы тока пользуются,—что является болѣе удобнымъ,—магнитнымъ дѣйствіемъ послѣдняго, при чемъ катушка, по которой проходитъ токъ, направляетъ или притягиваетъ магнитную стрѣлку или желѣзный стержень. Основанные на этомъ принципѣ приборы называются гальванометрами или амперметрами, при чемъ первое названіе присваивается преимущественно приборамъ, измѣряющимъ слабые токи, а второе — приборамъ, служащимъ для измѣренія сильныхъ токовъ.

Количество электричества, протекающее черезъ поперечное сѣченіе проводника въ секунду при силѣ тока въ 1 амперъ, называется кулономъ. Если, напримѣръ, сила тока, потребляемаго лампочкою накаливанія, составляетъ 0,5 ампера, то черезъ поперечное сѣченіе проводника въ секунду будетъ протекать 0,5 кулона; количество же электричества, протекшее за часъ или въ теченіе 3 600 секундъ, составитъ $0{,}5 \cdot 3\,600$ или 1 800 кулоновъ.

Такимъ образомъ, обозначая вообще черезъ

Q количество электричества въ кулонахъ,
i силу тока въ амперахъ,
t время въ секундахъ,

получаемъ:

$$Q = i \cdot t \text{ кулоновъ}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

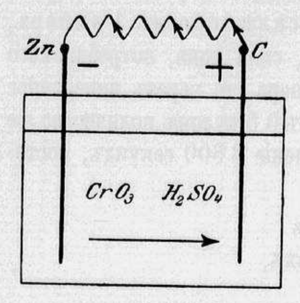
Тогда амперъ-часъ равенъ 3 600 кулонамъ.

2. Электродвижущая сила.

Мы уже указывали на предположеніе, что электричество какъ бы стекаетъ съ высокаго уровня на болѣе низкій. Разность уровней создается или при помощи машинъ, у которыхъ проволочная обмотка перемѣщается передъ полюсами, или при помощи гальваническихъ элементовъ, состоящихъ изъ двухъ химически различныхъ пластинъ, погруженныхъ въ жидкость. Такъ напримѣръ, хромовый элементъ, состоитъ изъ цинка (Zn) и угля (C), которые погружены въ смѣсь хромовой кислоты (CrO_3) съ сѣрной кислотой (H_2SO_4). Изслѣдованіе элемента при помощи электрометра показываетъ, что уголь на наружномъ концѣ заряженъ положительно, а цинкъ—отрицательно. Между внѣшними концами угля и цинка или между зажимами элемента существуетъ, такимъ образомъ, разность электрическихъ уровней, и при соединеніи послѣднихъ металлическимъ или жидкимъ проводникомъ происходитъ выравниваніе или электрическій токъ. Положитель-

ное электричество при этомъ во внѣшней цѣпи элемента протекаетъ отъ угля C къ цинку Zn (фиг. 1).

Но, несмотря на нейтрализацію, это перетеканіе происходитъ въ теченіе всего того времени, пока зажимы соединены между собою посредствомъ внѣшняго проводника. Мы должны, такимъ образомъ, предположить, что электричество, которое по наружному проводнику течетъ отъ угля къ цинку, внутри элемента течетъ отъ цинка къ углю, т. е. какъ бы снова доставляется съ нижняго уровня на верхній. Подобно этому вода, стекающая съ горъ въ море и испаряемая затѣмъ солнечною теплотою, снова приподнимается до высокаго уровня. Такимъ образомъ, мы видимъ, что въ элементѣ существуетъ какая-то причина, заставляющая электричество постоянно совершать круговое передвиженіе, прогоняя его при этомъ черезъ внутреннее сопротивленіе элемента и черезъ сопротивленіе внѣшней цѣпи. Эту причину перемѣщенія электричества называютъ электродвижущей силой и сравниваютъ ее съ насосомъ, поднимающимъ воду съ низкаго уровня на высокій. Электродвижущая сила уподобляется разности уровней и равна напряженію, измѣренному при разомкнутомъ элементѣ.



Фиг. 1.

Спрашивается теперь, какимъ образомъ опредѣлить это напряженіе, т. е. измѣрить его, или сравнить нѣсколько напряженій между собою? Для этой цѣли можно было бы воспользоваться бо̀льшимъ или меньшимъ отклоненіемъ золотого листочка электроскопа. Однако обыкновенно напряженіе измѣряютъ токомъ, который оно создаетъ. Если, напримѣръ, въ двухъ сообщающихся сосудахъ установить постояннымъ сопротивленіе въ соединительной трубкѣ, т. е. сдѣлать живое сѣченіе пропускного крана опредѣленнымъ и постояннымъ по величинѣ, то протекающее въ секунду количество воды будетъ пропорціонально напору или разности уровней. Подобно этому, если станемъ включать одинъ и тотъ же проводникъ, напримѣръ, обмотку изъ мѣдной проволоки гальванометра, послѣдовательно между зажимами сравниваемыхъ элементовъ или измѣряемаго напряженія, то обнаруживаемая въ гальванометрѣ болѣе или менѣе значительная сила тока будетъ результатомъ болѣе или менѣе значительнаго электрическаго напора, т. е. напряженія или электродвижущей силы.

При этомъ оказывается, что напряженіе или электродвижущая сила элемента является величиною постоянною, не зависящею совершенно отъ размѣровъ элемента. Мы можемъ сравнить въ этомъ отношеніи элементъ съ установленнымъ на нѣкоторой высотѣ резервуаромъ. Въ этомъ случаѣ получается извѣстная постоянная разность уровней, равная высотѣ уровня воды надъ мѣстомъ потребленія; при этомъ совершенно безразлично, будетъ ли резервуаръ большой или малый, лишь бы онъ всегда былъ наполненъ; сила струи воды будетъ зависѣть всецѣло только отъ потребителей, смотря по тому, насколько они откроютъ у себя краны. Равнымъ образомъ ошибочно говорить о силѣ тока элемента. Это выходитъ, какъ будто токъ находится въ элементѣ и долженъ выходить изъ послѣдняго съ разъ навсегда установленной для него силой. Ничего подобнаго не происходитъ: только электродвижущая сила является природнымъ свойствомъ элемента, — она существуетъ и тогда, когда элементъ не работаетъ. Сила же тока находится въ полной зависимости отъ того, много или мало мы беремъ тока. Послѣднее будетъ обусловливаться тѣмъ, предоставляемъ ли мы току болѣе или менѣе удобный для него путь, т. е. включаемъ между зажимами элемента болѣе или менѣе значительное сопротивленіе.

Мы можемъ избрать какое-нибудь напряженіе за единицу и съ нимъ сравнивать всѣ остальныя. Принятая на практикѣ единица равна приблизительно половинѣ напряженія вышеприведеннаго хромоваго элемента и называется вольтомъ. Для самыхъ употребительныхъ элементовъ получается тогда слѣдующая таблица:

Названіе.	СОСТАВЪ.	Напряженіе въ вольтахъ.
Хромовый элементъ.	Цинкъ и уголь въ сѣрной и хромовой кислотахъ	2 (почти).
Элементъ Даніеля.	Цинкъ въ разбавленной сѣрной кислотѣ, мѣдь въ мѣдномъ купоросѣ	1,07
Элементъ Бунзена.	Цинкъ въ разбавленной сѣрной кислотѣ, уголь въ концентрированной азотной кислотѣ	1,8—1,9
Элементъ Лекланше.	Цинкъ и уголь, окруженный перекисью марганца, въ растворѣ нашатырной соли	1,4
Элементъ Вестона.	Амальгама кадмія и ртуть, покрытая сѣрнокислой ртутью, въ растворѣ сѣрнокислаго кадмія	1,019

Цинкъ или близко стоящій къ нему по химическимъ свойствамъ кадмій образуютъ у этихъ элементовъ отрицательный полюсъ, и токъ во внѣшней цѣпи идетъ отъ положительнаго полюса къ цинку.

3. Законъ Ома.

Если присоединять одинъ и тотъ же проводникъ къ различнымъ электродвижущимъ силамъ, то сила тока, какъ мы уже видѣли, будетъ пропорціональна электродвижущей силѣ. Но пойдемъ дальше,—станемъ соединять зажимы одного и того же элемента поочередно, при помощи цѣлаго ряда проволокъ, различающихся между собою по матеріалу, длинѣ и поперечному сѣченію. Тогда замѣтимъ, что сила тока будетъ различная, откуда заключаемъ, что разные провода оказываютъ различное сопротивленіе прохожденію тока. При слабомъ токѣ, напримѣръ, мы заключаемъ о большомъ сопротивленіи проводника, при сильномъ—о небольшомъ сопротивленіи. Сила тока, слѣдовательно, обратно пропорціональна сопротивленію проводника. Подобный примѣръ мы можемъ видѣть и въ гидравликѣ: такъ, при одномъ и томъ же напорѣ количество воды, прогоняемое въ секунду сквозь узкую трубу, будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ больше длина трубы и треніе объ ея стѣнки, и чѣмъ уже она сама, или, говоря проще, чѣмъ больше въ трубѣ сопротивленіе. Мы приходимъ, поэтому, къ слѣдующему заключенію: сила тока пропорціональна электродвижущей силѣ и обратно пропорціональна электрическому сопротивленію. Обозначимъ теперь черезъ:

E электродвижущую силу въ вольтахъ,
i силу тока въ амперахъ,
W сопротивленіе всей цѣпи,

тогда имѣемъ:

$$i = \frac{E}{W} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Этотъ основной законъ электротехники называютъ закономъ Ома. Послѣ знака равенства необходимо было бы поставить еще коэффиціентъ пропорціональности, но послѣдній отпадаетъ, или, правильнѣе, будетъ равенъ единицѣ, если сопротивленіе выразить въ надлежащихъ единицахъ. Но наоборотъ, если уже принять коэффиціентъ равнымъ 1, то формула (2), выражающая законъ Ома, опредѣляетъ соотвѣтствующую единицу сопротивленія, которая уже не можетъ болѣе быть выбрана произвольно, разъ установлены единицы напряженія и силы тока. Пусть въ уравненіи (2) $i = 1$ и $E = 1$, тогда и $W = 1$. Т. е. за единицу сопротивленія надо принять такое сопротивленіе, при которомъ напряженіе въ 1 вольтъ производитъ токъ въ 1 амперъ. Эту единицу сопротивленія называютъ омомъ. Опытнымъ путемъ омъ опредѣляется, какъ сопротивленіе столбика ртути длиною 106,3 см. и поперечнаго сѣченія въ 1 мм^2.

Если, напримѣръ, электродвижущая сила динамомашины равна 115 вольтамъ, сопротивленіе той же машины 0,05 ома, внѣшнее сопротивленіе 1,1 ома, тогда:

$$E = 115 \text{ вольтъ},$$
$$W = 0{,}05 + 1{,}1 = 1{,}15 \text{ омовъ},$$
$$i = \frac{E}{W} = \frac{115}{1{,}15} = 100 \text{ амперъ}.$$

Опредѣленіе единицъ, устанавливаемое законоположеніями, отличается отъ предыдущаго. Напримѣръ, въ германскомъ законодательствѣ закономъ опредѣляется сначала единица сила тока (амперъ), т. е. сила тока, которая выдѣляетъ 1,118 млг. серебра въ секунду, затѣмъ устанавливается единица сопротивленія (омъ), т. е. сопротивленіе ртутнаго столбика въ 106,3 см. длины и въ 1 мм^2 поперечнаго сѣченія. Опредѣленіе же единицы напряженія является уже результатомъ примѣненія закона Ома, а именно: Вольтъ есть то напряженіе, которое при сопротивленіи цѣпи въ 1 омъ создаетъ токъ въ 1 амперъ.

Напишемъ теперь уравненіе (2) въ видѣ:

$$W = \frac{E}{i} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Это уравненіе математически выражаетъ то, о чемъ уже раньше упоминалось нами, а именно: подтверждается наше заключеніе, что сопротивленіе слѣдуетъ признать весьма значительнымъ, если сила тока при весьма большихъ электродвижущихъ силахъ все же остается очень небольшою. При точномъ опредѣленіи сопротивленія его слѣдуетъ принимать за отношеніе электродвижущей силы къ силѣ тока. Слѣдуетъ остерегаться считать сопротивленіе за противодавленіе, ибо давленіе или напряженіе по закону Ома равно произведенію силы тока на сопротивленіе. Дѣйствительно, переписавъ уравненіе (2) въ видѣ:

$$E = i \cdot W, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

находимъ, что лѣвая часть даннаго уравненія представляетъ напряженіе, доставляемое источникомъ тока, правая же часть—израсходованное напряженіе при сопротивленіи W и силѣ тока i. Оба они равны другъ другу.

Законъ Ома дѣйствителенъ не только для всей цѣпи, но также и для каждой отдѣльной части послѣдней. Положимъ, что токъ i проходитъ послѣдовательно черезъ нѣсколько сопротивленій w_1, w_2 и w_3 (фиг. 2). Обозначимъ напряженія у концовъ сопротивленій w_1, w_2 и w_3, черезъ e_1, e_2, и e_3, тогда на основаніи опыта получаемъ:

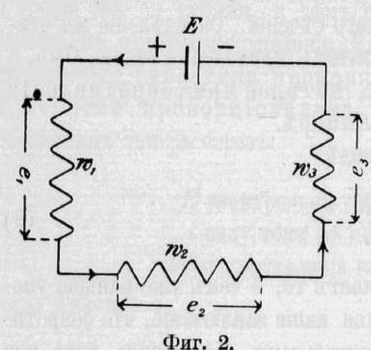
$$e_1 = i \cdot w_1, \qquad w_1 = \frac{e_1}{i},$$

$$e_2 = i \cdot w_2, \qquad w_2 = \frac{e_2}{i},$$

$$e_3 = i \cdot w_3, \qquad w_3 = \frac{e_3}{i}.$$

Какъ бы мы ни усиливали токъ, пользуясь, напримѣръ, болѣе сильными элементами, все же отношеніе напряженія у зажимовъ e къ силѣ тока i является постоянною величиною, если при этомъ, конечно, поперечное сѣченіе, матеріалъ и температура остаются безъ измѣненія. Это постоянное отношеніе мы и называемъ сопротивленіемъ. Оно, въ сущности, не что иное, какъ коэффиціентъ, устанавливающій пропорціональность между потерей напряженія и силою тока, согласно уравненію:

$$e_1 = i \cdot w_1.$$



Фиг. 2.

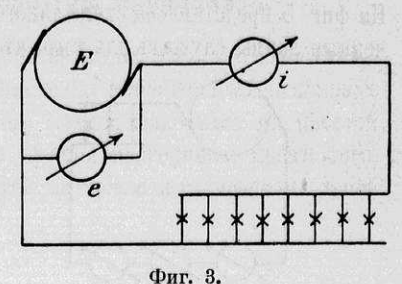
Если, напримѣръ, сопротивленіе, введенное передъ двумя послѣдовательно включенными дуговыми лампами, равно 1 ому, а сила тока 15 амп., то потеря напряженія въ введенномъ передъ лампами сопротивленіи будетъ $1 \cdot 15 = 15$ вольтъ. Если, теперь, напряженіе въ сѣти 110 вольтъ, то на обѣ лампы придется только $110 - 15 = 95$ вольтъ.

Пусть e вообще означаетъ напряженіе у зажимовъ на концахъ какого-нибудь сопротивленія w; тогда имѣемъ:

$$e = i \cdot w. \qquad (5)$$

Это уравненіе даетъ намъ возможность уяснить разницу между амперметромъ и вольтметромъ. Оба типа приборовъ основаны на магнитномъ дѣйствіи тока и различаются только способомъ включенія и конструкціей.

Амперметры включаются въ цѣпь главнаго тока, и ихъ обмотки имѣютъ небольшое число витковъ толстой проволоки. Вслѣдствіе этого даже при большей силѣ тока развивающаяся теплота и потеря напряженія въ приборѣ будутъ незначительны. Если же, наоборотъ, приборъ служитъ вольтметромъ, то его обмотки устраиваютъ съ большимъ числомъ витковъ тонкой проволоки и присоединяютъ его, включая иногда еще добавочное постоянное сопротивленіе къ измѣряемому напряженію [напримѣръ (фиг. 3), къ зажимамъ машины]. Такимъ образомъ, вольтметръ обыкновенно помѣщаютъ въ отвѣтвленіи, присоединяя его параллельно къ тому сопротивленію, между зажимами котораго желаютъ измѣрить напряженіе.

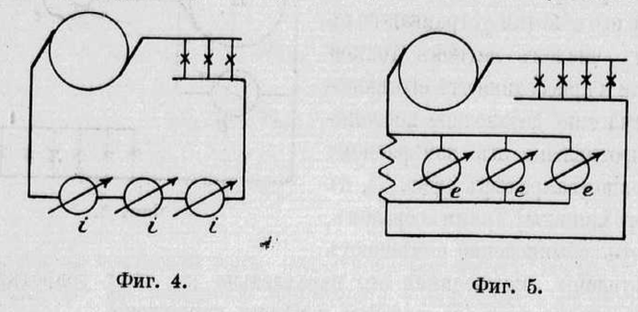


Фиг. 3.

Токъ, который идетъ въ вольтметръ, для полезной работы потерянъ. Большое сопротивленіе прибора имѣетъ, слѣдовательно, своею цѣлью по возможности уменьшить силу тока, проходящую черезъ вольтметръ. Послѣднее является необходимымъ также для того, чтобы включеніе вольтметра проходило безслѣдно для напряженія или тока потребляющихъ энергію аппаратовъ. Для полученія сильнаго магнитнаго дѣйствія необходимо имѣть много витковъ проволоки, и условія мѣста и экономіи заставляютъ примѣнять тонкую проволоку. Приборъ дѣйствуетъ въ данномъ случаѣ, собственно, какъ амперметръ, ибо отклоненія стрѣлки зависятъ отъ силы проходящаго черезъ обмотки тока. Но, умножая эту силу тока на сопротивленія вольтметра, получаемъ напряженіе у зажимовъ прибора, которое, понятно, мы прочитываемъ и на шкалѣ прибора. Сходство по существу амперметра съ вольтметромъ иллюстрируется наилучшимъ образомъ тѣмъ, что существуютъ приборы, которые служатъ для обѣихъ цѣлей. Если, напримѣръ, чувствительность амперметра такова, что тысячная доля ампера вызываетъ отклоненіе на одинъ градусъ, то, примѣняя такой приборъ, какъ вольтметръ, и увеличивая его сопротивленіе путемъ включенія добавочнаго сопротивленія до 1 000 омовъ, мы получимъ, что одно дѣленіе отклоненія будетъ соотвѣтствовать напряженію въ $\frac{1}{1\,000} \cdot 1\,000 = 1$ вольтъ.

Изъ всего вышесказаннаго само собою вытекаетъ, что при сравненіи двухъ или нѣсколькихъ амперметровъ между собою необходимо включать ихъ послѣдовательно другъ за другомъ (фиг. 4). Для сравненія же двухъ

вольтметровъ необходимо, наборотъ, включать ихъ параллельно, при этомъ всѣ они должны своими зажимами присоединяться къ концамъ того сопротивленія w, между концами котораго желательно измѣрить напряженіе. На фиг. 5 представлена схема такого включенія, при чемъ добавочно включенныя лампы служатъ для того, чтобы проглотить бо́льшую или меньшую



Фиг. 4. Фиг. 5.

часть напряженія машины и тѣмъ самымъ регулировать напряженіе у сопротивленія w.

Но особенно надо остерегаться включать два сравниваемые вольтметра послѣдовательно другъ за другомъ, такъ какъ общее напряженіе тогда, при неодинаковомъ сопротивленіи вольтметровъ, распредѣлится неравномѣрно на оба прибора, а именно—соотвѣтственно сопротивленію каждаго изъ нихъ.

Указавъ, такимъ образомъ, основной принципъ амперметра и вольтметра, мы должны упомянуть еще о примѣненіи ихъ для измѣренія сопротивленій. При помощи наблюденія напряженія и силы тока, т. е. косвеннымъ путемъ, лучше всего опредѣляются очень малыя или очень большія сопротивленія. Положимъ, напримѣръ, что токъ въ 10 амперъ идетъ черезъ обмотку якоря находящагося въ покоѣ электродвигателя, и пусть напряженіе у зажимовъ его при этомъ токѣ получается равнымъ 2 вольтамъ; тогда сопротивленіе якоря опредѣлится на основаніи уравненія:

$$w_a = \frac{e}{i} = \frac{2}{10} = 0{,}2 \text{ ома.}$$

Преимущество этого способа состоитъ въ томъ, что сопротивленіе можно опредѣлять, не включая какого-либо добавочнаго заранѣе извѣстнаго сопротивленія. Но при этомъ предполагается, что въ измѣряемой вѣтви не дѣйствуетъ никакая посторонняя электродвижущая сила, такъ какъ въ послѣднемъ случаѣ вычисленіе сопротивленія будетъ не столь простымъ, какъ выше.

4. Зависимость сопротивленія отъ матеріала, поперечнаго сѣченія, длины и температуры проводника.

Значеніе закона Ома заключается собственно въ томъ, что сопротивленіе проводника, т. е. постоянное отношеніе между напряженіемъ на концахъ послѣдняго и протекающимъ черезъ него токомъ, находится въ простой зависимости отъ длины и поперечнаго сѣченія проводника; кромѣ того, сопротивленіе существенно зависитъ отъ матеріала и въ незначительной степени отъ температуры.

Обозначимъ черезъ:

l длину проводника въ мтр,
q поперечное сѣченіе въ мм^2,
ρ постоянный коэффиціентъ матеріала.

Тогда на основаніи опыта получаемъ:

$$w = \rho \cdot \frac{l}{q} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (6)$$

Сопротивленіе проводника, слѣдовательно, пропорціонально его длинѣ и обратно пропорціонально его поперечному сѣченію. Множитель ρ у различныхъ матеріаловъ различенъ. Значеніе его мы получимъ, если подставимъ въ уравн. (6) $l = 1$ и $q = 1$, тогда $w = \rho$. Коэффиціентъ ρ, такимъ образомъ, есть сопротивленіе проволоки изъ даннаго матеріала длиною въ 1 мтр и поперечнаго сѣченія въ 1 мм^2. Эту величину называютъ удѣльнымъ сопротивленіемъ. Для опредѣленія его измѣряютъ у какой-либо проволоки величины w, l и q и по этимъ даннымъ вычисляютъ ρ. Измѣреніе даетъ слѣдующія значенія:

Мѣдь при 15°	$\rho = 0{,}017$,
Ртуть	» $= 0{,}94 = \frac{1}{1{,}063}$,
Нейзильберъ (никелинъ)	» $= 0{,}2 - 0{,}4$,
Уголь	» $= 100 - 1\,000$,
Сѣрная кислота 25—30%	» $= 14\,000$.

Поэтому сопротивленія для ослабленія тока или для поглащенія напряженія дѣлаютъ изъ никелина, тогда какъ обмотку машины и провода — изъ матеріала наивысшей проводимости, т. е. мѣди, чтобы из-

бѣжать безполезной потери напряженія. Но и въ данномъ случаѣ потеря напряженія будетъ не совсѣмъ-то ужъ ничтожною. Предположимъ, что въ данной цѣпи длина одиночнаго провода равна 20 мтр, сила тока $i = 60$ амперъ и поперечное сѣченіе $= 50$ мм², тогда длина всей цѣпи (прямой и обратный проводы) $l = 2 \cdot 20 = 40$ мтр и, слѣдовательно,

$$w = \rho \cdot \frac{l}{q} = \frac{0{,}017 \cdot 40}{50} = 0{,}0136 \text{ ома.}$$

Потеря напряженія въ такой подводящей токъ цѣпи будетъ:

$$e_1 = i \cdot w = 0{,}0136 \cdot 60 = 0{,}8 \text{ вольта.}$$

Удѣльное сопротивленіе—величина не постоянная; оно у всѣхъ металловъ увеличивается съ возрастаніемъ температуры, при чемъ увеличеніе сопротивленія почти пропорціонально повышенію температуры. Температурный коэффиціентъ опредѣляется, какъ увеличеніе сопротивленія, приходящееся на 1 омъ при возростаніи температуры на 1 градусъ. Пусть означаютъ:

w_1 начальное сопротивленіе при температурѣ T_1,
w_2 конечное » » » T_2,
$\Delta\rho$ температурный коэффиціентъ,

тогда получаемъ:

$$w_2 = w_1 \left[1 + \Delta\rho \left(T_2 - T_1\right)\right]$$

или

$$\Delta\rho = \frac{w_2 - w_1}{w_1 \left(T_2 - T_1\right)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Для мѣди измѣренія даютъ въ среднемъ $\Delta\rho = 0{,}004$, т. е. сопротивленіе мѣди возрастаетъ при повышеніи температуры на 1 градусъ на 0,4%. Такъ какъ температура машинъ во время работы доходитъ приблизительно до 50°, то увеличеніе сопротивленія за это время составитъ около $0{,}4 \cdot 50 = 20\%$. Въ виду этого при расчетахъ удѣльное сопротивленіе нагрѣтой мѣди принимаютъ равнымъ въ круглыхъ числахъ 0,02, вмѣсто 0,017.

При помощи того же извѣстнаго температурнаго коэффиціента 0,004 можно опредѣлить повышеніе температуры той части машины, къ которой нельзя подступиться съ термометромъ. Такъ, положимъ, что сопротивленіе обмотки электромагнита при 15° = 50 омовъ и сила тока въ обмоткѣ электромагнита послѣ нсколькихъ часовъ работы равна 2 амперамъ. Напряженіе у зажимовъ обмотки электромагнита равно 114 вольтамъ. Тогда сопротивленіе этой обмотки во время работы будетъ $\frac{114}{2} = 57$ омовъ; слѣдовательно имѣемъ:

$$w_1 = 50, \qquad w_2 = 57, \qquad T_1 = 15^\circ, \qquad \Delta\rho = 0{,}004.$$

Изъ уравненія (7) получаемъ:

$$0{,}004 = \frac{57 - 50}{50(T_2 - 15)},$$

откуда:

$$T_2 = 50^\circ.$$

Температура повысилась, слѣдовательно, на 35°.

Такъ какъ температурный коэффиціентъ металловъ, за исключеніемъ ртути, очень великъ, то это дѣлаетъ неудобнымъ примѣненіе ихъ для точныхъ эталоновъ сопротивленій. Для этихъ цѣлей употребляютъ такіе сплавы, нейзильберъ или никелинъ, которые наряду съ такимъ преимуществомъ, какъ значительное удѣльное сопротивленіе, одновременно обладаютъ очень незначительнымъ температурнымъ коэффиціентомъ. Послѣдній составляетъ 0,0002 — 0,0004. Сопротивленіе же манганина (сплава мѣди съ марганцемъ), почти совершенно не зависитъ отъ температуры.

Полную противоположность металламъ представляютъ уголь и жидкости, сопротивленіе которыхъ съ возрастаніемъ температуры уменьшается, и температурный коэффиціентъ у нихъ, слѣдовательно, отрицательный. Отсюда вытекаетъ, что сопротивленіе лампочки накаливанія, въ виду значительныхъ измѣненій температуры, слѣдуетъ опредѣлять при ея горѣніи, т. е. опредѣлять это сопротивленіе изъ отношенія напряженія у зажимовъ лампочки къ силѣ протекающаго черезъ нее тока.

Иногда цѣлесообразно бываетъ вводить въ расчетъ проводимость, т. е. величину, обратную сопротивленію. Удѣльная проводимость мѣди, напримѣръ, равняется $1 : 0{,}017 = 59$, или въ круглыхъ числахъ 60. Удѣльная проводимость жидкостей раньше не выражалась въ обратной величинѣ ома, а относилась обыкновенно къ ртути. Но за послѣднее время въ сочиненіяхъ по электрохиміи она указывается уже всегда въ обратной величинѣ ома.

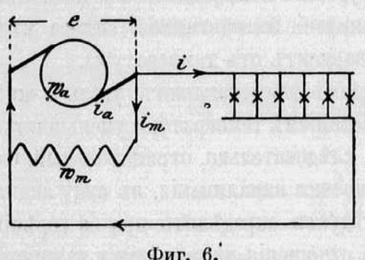
5. Законы Кирхгофа.

а) Первый законъ Кирхгофа.

Во всякой точкѣ сумма подходящихъ токовъ равна суммѣ уходящихъ токовъ. Если подходящіе токи принять за положительные, а уходящіе за отрицательные, то для каждой точки развѣтвленій получаемъ:

$$\Sigma i = 0 \ldots \ldots \ldots (8)$$

Этотъ законъ существенно важенъ для пониманія электрическаго тока. Представленіе многихъ начинающихъ о томъ, что электричество расходуется вдоль всего пути отъ положительнаго зажима къ отрицательному, невѣрно. Все количество электричества, которое выходитъ изъ положительнаго зажима, притекаетъ обратно въ отрицательный зажимъ, а оттуда черезъ источникъ тока снова въ положительный; оно также нигдѣ вдоль указаннаго кругового пути не возникаетъ вновь, нигдѣ не скопляется и нигдѣ не исчезаетъ.



Фиг. 6.

Совершенно аналогично вода, доставляемая въ дома по водопроводу, вѣдь не расходуется такимъ образомъ, что пропадаетъ безслѣдно: все количество ея достигаетъ нижняго уровня и оттуда, испаряясь, снова перемѣщается на высшій уровень. Если на практикѣ и говорятъ вообще о потерѣ тока, то подъ этимъ подразумѣваютъ только то, что токъ отчасти отыскиваетъ себѣ такой путь, на которомъ его нельзя использовать. Что же на самомъ дѣлѣ расходуется вдоль цѣпи?—Не токъ и не количество электричества, а напряженіе.

Первый законъ Кирхгофа даетъ намъ возможность опредѣлять въ точкѣ развѣтвленія по двумъ или нѣсколькимъ токамъ новый токъ. Положимъ, напряженіе у зажимовъ шунтовой динамомашины (съ параллельнымъ возбужденіемъ) составляетъ 220 вольтъ, сила тока во внѣшней цѣпи (фиг. 6) $i = 100$ амперъ, сопротивленіе обмотки электромагнитовъ, включенной параллельно, $w_m = 50$ омовъ. Требуется опредѣлить силу тока въ якорѣ i_a.

На основаніи закона Ома имѣемъ:

$$i_m = \frac{e}{w_m} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ ампера.}$$

Примѣняя далѣе первый законъ Кирхгофа, получаемъ:

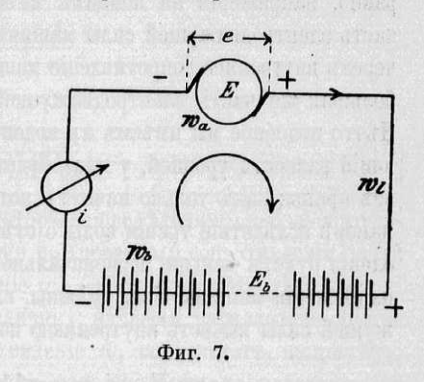
$$i_a = i + i_m = 100 + 4,4 = 104,4 \text{ ампера.}$$

в) Второй законъ Кирхгофа.

Во всякой замкнутой цѣпи алгебраическая сумма произведеній изъ силъ токовъ на соотвѣтствующія сопротивленія равняется алгебраической суммѣ электродвижущихъ силъ, дѣйствующихъ въ этой же цѣпи.

$$\Sigma i \cdot w = \Sigma E \ldots \ldots \ldots (9)$$

При примѣненіи этого закона надо слѣдовать въ цѣпи или въ замкнутой части ея по одному произвольно выбранному направленію, и всѣ токи и электродвижущія силы, дѣйствующіе въ направленіи противоположномъ избранному, считать за отрицательные. Если же является сомнѣніе относительно истиннаго направленія тока или электродвижущей силы, то слѣдуетъ предварительно этому току или этой электродвижущей силѣ дать произвольное направленіе. Если, послѣ вычисленія, значенія ихъ окажутся отрицательными, то это покажетъ, что дѣйствительное направленіе какъ разъ обратно тому, которое было нами выбрано.



Фиг. 7.

Положимъ, машина развиваетъ электродвижущую силу $E = 116$ вольтамъ и навстрѣчу ей (для зарядки) включена аккумуляторная батарея изъ 50 элементовъ, каждый въ 2 вольта (фиг. 7). Пусть сопротивленіе машины w_a будетъ 0,1 ома, сопротивленіе батареи $w_b = 0,18$ ома и сопротивленіе проводовъ $w_l = 0,12$ ома. Нужно найти силу тока i, а также напряженіе у зажимовъ машины и батареи.

Встрѣчная электродвижущая сила батареи $E_b = 50 \cdot 2 = 100$ вольтъ. Пройдемъ теперь цѣпь по направленію часовой стрѣлки, т. е. по направленію, указанному стрѣлкой; тогда, на основаніи уравн. (9), получимъ:

$$i \cdot w_a + i \cdot w_b + i \cdot w_l = E - E_b$$

или

$$i = \frac{E - E_b}{w_a + w_b + w_l} = \frac{116 - 100}{0,1 + 0,18 + 0,12} = 40 \text{ амперъ.}$$

Отдѣльныя потери напряженія, слѣдующія закону Ома, или, такъ называемыя, омическія потери напряженія, будутъ:

$i \cdot w_a = 40 \cdot 0,1 =$ 4 вольта
$i \cdot w_b = 40 \cdot 0,18 =$ 7,2 »
$i \cdot w_l = 40 \cdot 0,12 =$ 4,8 »
плюсъ противоэлектродвижущая сила 100 »

Всего. . . . . 116 вольтъ.

Такимъ образомъ, видимъ, что электродвижущая сила въ 116 вольтъ расходуется на преодоленіе противодѣйствующей электродвижущей силы батареи и на отдѣльныя омическія потери напряженія.

Для нахожденія напряженія у зажимовъ машины, или, что все равно, напряженія на концахъ внѣшняго сопротивленія, замѣтимъ, что часть электродвижущей силы машины расходуется при прохожденіи тока черезъ внутреннее сопротивленіе машины на преодолѣніе этого послѣдняго, большая же часть электродвижущей силы остается для внѣшней цѣпи. Нѣчто подобное мы имѣемъ въ водопроводѣ. Полный напоръ, соотвѣтствующій разности уровней, у насъ будетъ только тогда, когда будутъ заперты всѣ краны; какъ только начнутъ потреблять воду, произойдетъ потеря въ напорѣ вслѣдствіе тренія воды о стѣнки трубъ, и напоръ въ мѣстѣ потребленія будетъ меньше первоначальной разности уровней. Для опредѣленія напряженія машины e мы должны, слѣдовательно, изъ полной электродвижущей силы вычесть внутреннюю потерю напряженія; тогда получимъ:

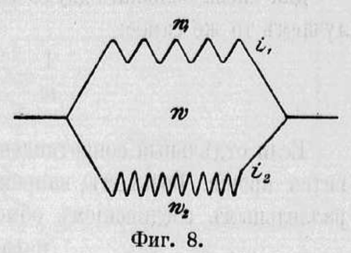
$$e = E - i \cdot w_a = 116 - 4 = 112 \text{ вольтъ.}$$

Другое распредѣленіе напряженія будетъ у батареи при ея зарядкѣ. Въ этомъ случаѣ напряженіе у зажимовъ батареи e_b должно выполнить двоякую задачу: преодолѣть противодѣйствующую электродвижищую силу E_b и доставить теряемое напряженіе $i \cdot w_b$. Слѣдовательно:

$$e_b = E_b + i \cdot w_b = 100 + 7,2 = 107,2 \text{ вольта.}$$

6. Сопротивленіе и распредѣленіе тока въ развѣтвленныхъ цѣпяхъ.

Само собой понятно, что сопротивленіе нѣсколькихъ послѣдовательно, одинъ за другимъ, включенныхъ проводниковъ будетъ равняться суммѣ отдѣльныхъ сопротивленій. Параллельное же соединеніе двухъ сопротивленій w_1 и w_2 въ томъ видѣ, какъ оно представлено на фиг. 8, напротивъ, ни въ коемъ случаѣ не дастъ увеличенія сопротивленія, такъ какъ путь для тока, вслѣдствіе параллельнаго включенія, становится болѣе удобнымъ. Полное сопротивленіе w должно, такимъ образомъ, стать меньше каждаго отдѣльнаго сопротивленія w_1 и w_2; проводимость же развѣтвленія,—что подтверждается также опытомъ, — равняется суммѣ проводимостей отдѣльныхъ параллельныхъ вѣтвей, т. е.



Фиг. 8.

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2},$$

тогда получаемъ:

$$w = \frac{w_1 \cdot w_2}{w_1 + w_2} \quad \ldots \ldots \ldots (10)$$

Для изготовленія, напримѣръ, нѣкотораго опредѣленнаго небольшого сопротивленія подогнать длину проволоки до требуемаго сопротивленія почти невозможно. Тогда берутъ сопротивленіе w_1, большее на нѣсколько процентовъ требуемаго и понижаютъ его величину, включая параллельно другое сопротивленіе w_2. Положимъ, сопротивленіе w_1 составляетъ, напримѣръ, 0,102 ома. Спрашивается, сколько омовъ надо включить параллельно для того, чтобы полное сопротивленіе составляло 0,1 ома?

Изъ уравненія (10) имѣемъ:

$$0,1 = \frac{0,102 \cdot w_2}{0,102 + w_2},$$

тогда:

$$w_2 = 5,1 \text{ ома.}$$

Предположимъ, что при опредѣленіи этого сопротивленія была сдѣлана ошибка въ 2°/₀, т. е. что въ дѣйствительности w_2 равняется только 5 омамъ. Тогда получаемъ:

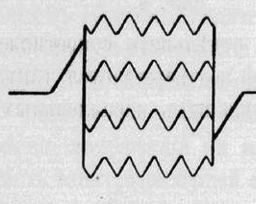
$$w = \frac{w_1 \cdot w_2}{w_1 + w_2} = \frac{0{,}102 \cdot 5}{0{,}102 + 5} = 0{,}09996.$$

Полное сопротивленіе, слѣдовательно, въ дѣйствительности будетъ опредѣлено съ ошибкою только въ 0,04%.

Для числа большаго двухъ параллельно включенныхъ сопротивленій получаемъ то же самое:

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (11)$$

Если отдѣльныя сопротивленія равны между собою, то расчетъ становится проще. Возьмемъ, напримѣръ, четырехъ-полюсную машину съ параллельнымъ соединеніемъ обмотокъ якоря, состоящаго изъ 4 равныхъ параллельно-соединенныхъ группъ (фиг. 9). Пусть вся длина намотанной на якорь проволоки равняется 200 мтр., поперечное сѣченіе проволоки 10 мм²; тогда сопротивленіе каждой группы при удѣльномъ сопротивленіи нагрѣтой мѣди 0,02 будетъ:



Фиг. 9.

$$\rho \cdot \frac{l}{q} = 0{,}02 \cdot \frac{200/4}{10} \text{ ома.}$$

Полное сопротивленіе четырехъ равныхъ параллельныхъ вѣтвей будетъ въ четыре раза меньше, т. е.

$$w_a = \frac{0{,}02 \cdot 200}{4^2 \cdot 10} = 0{,}025 \text{ ома.}$$

Для нахожденія **соотношенія между силами токовъ** въ развѣтвленіи, представленномъ на фиг. 8, мы замѣтимъ, что напряженіе на концахъ сопротивленія w_1 и w_2 будетъ одно и то же, равное напряженію у зажимовъ e. Такимъ образомъ, если i_1 токъ въ сопротивлніи w_1 и i_2 токъ въ сопротивленіи w_2, то получаемъ:

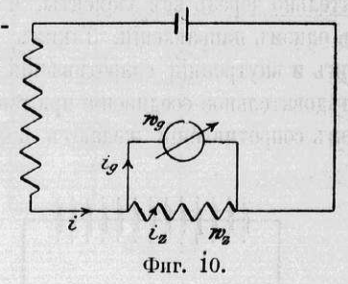
$$e = i_1 \cdot w_1 = i_2 \cdot w_2$$

откуда

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (12)$$

Силы тока въ отвѣтвленіяхъ, слѣдовательно, обратно пропорціональны сопротивленіямъ этихъ отвѣтвленій. Этимъ зако-

номъ пользуются, когда требуется измѣрить сильный токъ при помощи чувствительнаго гальванометра, приспособленнаго только для слабыхъ токовъ. Въ главный токъ тогда вводятъ большое сопротивленіе, а гальванометръ включаютъ параллельно небольшому извѣстному сопротивленію. Пусть w_g сопротивленіе гальванометра и w_z параллельно включенное съ нимъ сопротивленіе, i_g токъ въ гальванометрѣ, i_z токъ въ параллельномъ сопротивленіи w_z; тогда получаемъ (фиг. 10):



Фиг. 10.

$$\frac{i_g}{i_z} = \frac{w_z}{w_g}$$

или

$$\frac{i_g}{i_g + i_z} = \frac{w_z}{w_g + w_z}.$$

Согласно фиг. 10, $i_g + i_z$ не что иное, какъ главный токъ i. Тогда имѣемъ:

$$i = i_g \cdot \frac{w_z + w_g}{w_z}.$$

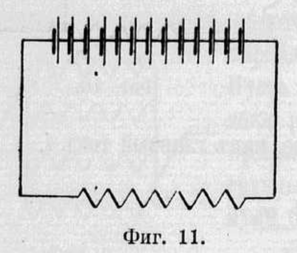
Для бóльшаго удобства сопротивленіе отвѣтвленія дѣлаютъ равнымъ $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$ или $\frac{1}{999}$ сопротивленія гальванометра. Пусть сопротивленіе гальванометра, напримѣръ, $=100$ омовъ и сопротивленіе отвѣтвленія $\frac{100}{999}$ омовъ; тогда имѣемъ:

$$i = i_g \cdot \frac{\frac{100}{999} + 100}{\frac{100}{999}} = 1000\, i_g.$$

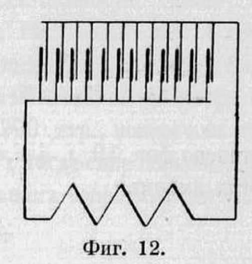
Главный токъ, такимъ образомъ, въ 1000 разъ сильнѣе тока гальванометра. Слѣдуетъ, между прочимъ, обращать вниманіе на то, чтобы до гальванометра и параллельнаго съ нимъ сопротивленія въ главной цѣпи было включено нѣкоторое сопротивленіе, иначе гальванометръ вмѣстѣ съ параллельнымъ сопротивленіемъ w_z будетъ включенъ непосредственно между зажимами источника, и сопротивленіе w_z не окажетъ никакого вліянія на силу тока въ гальванометрѣ.

7. Послѣдовательное и параллельное соединеніе элементовъ.

При послѣдовательномъ соединеніи элементовъ положительный зажимъ одного элемента соединяется съ отрицательнымъ зажимомъ другого элемента (фиг. 11). При этомъ одинъ и тотъ же токъ проходитъ послѣдовательно черезъ всѣ элементы, и всѣ электродвижущія силы дѣйствуютъ въ одномъ направленіи. Такимъ образомъ, какъ электродвижущія силы, такъ и внутреннія сопротивленія элементовъ складываются. Поэтому послѣдовательное соединеніе примѣняютъ тогда, когда при большомъ внѣшнемъ сопротивленіи желаютъ получить токъ большой силы. Въ данномъ



Фиг. 11.



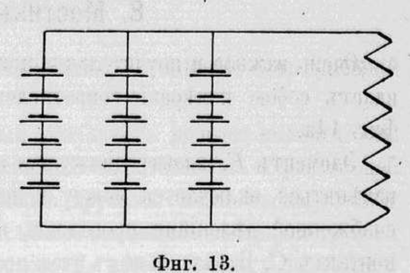
Фиг. 12.

случаѣ общая электродвижущая сила возрастаетъ значительно больше, чѣмъ сумма внутреннихъ сопротивленій соединяемыхъ элементовъ, вслѣдствіе чего увеличеніемъ послѣдней можно пренебречь.

При параллельномъ соединеніи (фиг. 12), наоборотъ, всѣ положительные зажимы соединяютъ между собою, всѣ отрицательные—между собою. Сопротивленіе всей батареи при такомъ соединеніи становится весьма малымъ, зато и напряженіе во внѣшней цѣпи остается равнымъ напряженію одного только элемента. Параллельно-соединенныя электродвижущія силы не складываются другъ съ другомъ, подобно тому, какъ параллельно дѣйствующія давленія. Такъ, проведя, напримѣръ, изъ двухъ резервуаровъ, расположенныхъ на одной высотѣ, двѣ трубы, и не принимая во вниманіе потери на треніе, мы получаемъ напоръ, равный напору одного лишь резервуара. Такимъ образомъ къ параллельному соединенію для полученія сильнаго тока прибѣгаютъ лишь въ томъ случаѣ, когда внѣшнее сопротивленіе невелико, и потому для полученія такого тока нѣтъ надобности въ въ большомъ напряженіи. При этомъ является та выгода, что сопротивленіе батареи, съ которымъ приходится теперь считаться при маломъ внѣшнемъ сопротивленіи, само весьма незначительно, а потому является возможнымъ получить сильный токъ.

Кромѣ указанныхъ выше комбинацій употребляютъ еще смѣшанное соединеніе (фиг. 13), при которомъ нѣсколько элементовъ соединяютъ послѣдовательно, а составленныя такимъ образомъ группы соединяютъ параллельно. Интересно при этомъ опредѣлить, при какихъ условіяхъ сила тока достигаетъ своего наибольшаго значенія. Пусть

w внѣшнее сопротивленіе,
w_b сопротивленіе всей батареи,
w_i внутреннее сопротивленіе одного элемента,
x число послѣдовательно соединенныхъ элементовъ,
E электродвижущая сила одного элемента,
z число элементовъ.



Фиг. 13.

Число параллельныхъ группъ тогда будетъ $\frac{z}{x}$, и сопротивленіе каждой группы $w_i \cdot x$. Сопротивленіе же всей батареи:

$$w_b = \frac{w_i \cdot x}{\frac{z}{x}} = \frac{w_i \cdot x^2}{z}.$$

Такъ какъ электродвижущая сила всей батареи равна электродвижущей силѣ одной группы, т. е. равняется $E \cdot x$, то сила тока i всей батареи, согласно закону Ома, будетъ:

$$i = \frac{E \cdot x}{w + \frac{w_i \cdot x^2}{z}} = \frac{E}{\frac{w}{x} + \frac{w_i \cdot x}{z}}.$$

Это выраженіе будетъ наибольшимъ, когда знаменатель будетъ минимумъ. Примемъ x за перемѣнную и продифференцируемъ по ней функцію

$$f(x) = \frac{w}{x} + \frac{w_i \cdot x}{z}.$$

Тогда имѣемъ:

$$f'(x) = -w \cdot x^{-2} + \frac{w_i}{z}.$$

Приравнявъ эту производную нулю, получаемъ:

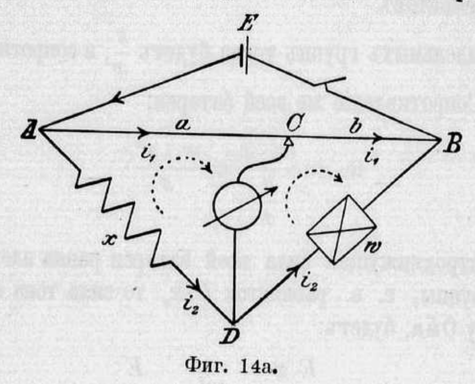
$$w = \frac{w_i \cdot x^2}{z}.$$

Правая часть этого равенства представляетъ собою не что иное, какъ внутреннее сопротивленіе батареи. Слѣдовательно, для того, чтобы при данной электродвижущей силѣ и данномъ числѣ элементовъ получить наибольшую силу тока, необходимо внутреннее сопротивленіе приравнять внѣшнему.

8. Мостикъ Уитстона.

Очень важное и поучительное примѣненіе закона Кирхгофа представляетъ собою измѣреніе сопротивленій при помощи мостика Уитстона. Фиг. 14а.

Элементъ E, электродвижущая сила котораго неизвѣстна и можетъ измѣняться, включается между концами A и B голой калибрированной и снабженной дѣленіями проволоки, по которой перемѣщается скользящій контактъ C. Параллельно съ этою проволокою включено при помощи соеди-



Фиг. 14а.

нительнаго проводника, сопротивленіемъ котораго можно пренебречь, отвѣтвленіе, состоящее изъ измѣряемаго сопротивленія x и изъ извѣстнаго сопротивленія w. Гальванометръ однимъ концомъ своимъ присоединяется къ скользящему контакту C, а другимъ къ мѣсту соединенія сопротивленій x и w. Скользящій контактъ перемѣщаютъ до тѣхъ поръ, пока гальванометръ не покажетъ отсутствія тока.

Тогда токъ i_1 пройдетъ одновременно и черезъ сопротивленіе a, и черезъ сопротивленіе b, а токъ i_2 черезъ сопротивленія x и w. Обойдемъ по часовой стрѣлкѣ, т. е. по направленію пунктирной стрѣлки, нижній лѣвый замкнутый контуръ и замѣтимъ при этомъ, что въ данной части цѣпи нѣтъ никакой электродвижущей силы, и что токъ въ гальванометрѣ равенъ нулю. Тогда, по второму закону Кирхгофа, получимъ:

$$i_1 \cdot a + 0 - i_2 \cdot x = 0.$$

Подобнымъ же образомъ и для праваго нижняго контура будемъ имѣть:

$$i_1 \cdot b - i_2 \cdot w + 0 = 0$$

отсюда слѣдуетъ:

$$\frac{a}{b} = \frac{x}{w} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

Въ этомъ равенствѣ отношеніе $a : b$ выражаетъ отношеніе сопротивленій обѣихъ частей эталонной проволоки.

Для лучшаго уясненія полученный результатъ полезно вывести безъ помощи закона Кирхгофа, путемъ сравненія съ истеченіемъ воды, идущей по двумъ параллельнымъ вертикальнымъ трубамъ. Если въ какой-либо точкѣ первой трубы устроить горизонтальное соединеніе со второю трубою, то черезъ такой патрубокъ вода не потечетъ, ибо на концахъ послѣдняго не будетъ никакой разности уровней. То же самое мы имѣемъ въ мостикѣ Уитстона. Если въ гальванометрѣ тока нѣтъ, то между точками C и D также какъ бы не существуетъ разности уровней, и паденіе напряженія отъ A до C равно паденію отъ A до D. Иначе говоря, получаемъ слѣдующую зависимость:

$$i_1 \cdot a = i_2 \cdot x.$$

Равнымъ образомъ:

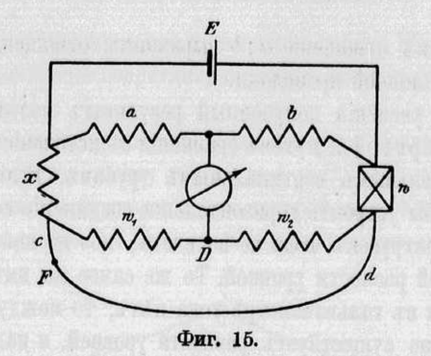
$$i_2 \cdot b = i_1 \cdot w.$$

Откуда получается равенство (14).

Иногда вмѣсто сопротивленій a и b калибрированной проволоки употребляютъ магазины сопротивленій.

Описанный выше методъ пригоденъ для измѣренія сопротивленій средней величины. При очень малыхъ сопротивленіяхъ, сопротивленія соединительныхъ проводниковъ могутъ вызвать значительныя ошибки въ измѣреніи. Этого можно избѣжать присоединеніемъ элемента непосредственно къ концамъ сопротивленій x и w и примѣненіемъ вмѣсто сопротивленій калибрированной проволоки магазиновъ сопротивленій, по сравненію съ которыми сопротивленіемъ соединительныхъ проводниковъ можно пренебречь. Исключить же вовсе вліяніе сопротивленія соединительныхъ проводниковъ между x и w при обыкновенной схемѣ мостика Уитстона— не представляется возможнымъ. Присоединяя на фиг. 14а гальванометръ непосредственно къ концу сопротивленія x, мы увеличимъ w на величину соединенія между x и w. Приключая же, наоборотъ, гальванометръ непосредственно къ w, получимъ x очень большимъ.

Отсюда не трудно понять, что гальванометръ необходимо присоединить къ сопротивленіямъ w и x при помощи двухъ сопротивленій w_1 и w_2, какъ это имѣетъ мѣсто при двойномъ мостикѣ Томсона (фиг. 15). При этомъ сопротивленія x и w остаются соединенными при помощи представленнаго на схемѣ внизу проводника. Далѣе слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что



Фиг. 15.

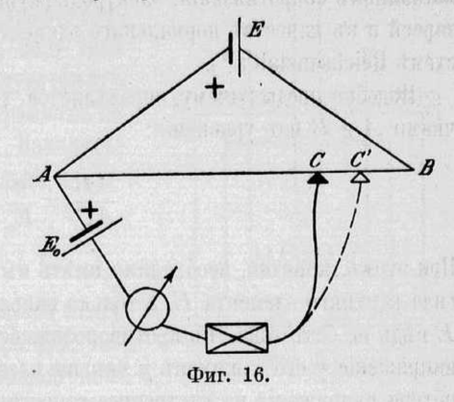
къ каждому концу сопротивленія x примыкаютъ непосредственно два проводника. Сопротивленія w_1 и x_2 необходимо выбирать такимъ образомъ, чтобы они относились другъ къ другу, какъ $a:b$. Точка D тогда имѣетъ тотъ же электрическій уровень, что и точка F, раздѣляющая сопротивленіе соединительнаго провода въ отношеніи $c:d = w_1:w_2 = a:b$. Мы можемъ, слѣдовательно, считать гальванометръ присоединеннымъ не къ D, а какъ бы непосредственно къ точкѣ F и, сдѣлавъ при помощи измѣненія сопротивленія w токъ въ гальванометрѣ равнымъ нулю, получаемъ:

$$\frac{a}{b} = \frac{x+c}{w+d}.$$

Такъ какъ $c:d = a:b$, то и отношеніе $x:w$ должно также равняться $a:b$. Сопротивленіе соединительной линіи, такимъ образомъ, исключается, и отсюда является возможнымъ съ большою точностью измѣрять такія небольшія сопротивленія, какъ, напримѣръ, сопротивленіе якорей машинъ.

9. Компенсаціонный методъ опредѣленія напраженія.

Къ концамъ калибрированной проволоки AB (фиг. 15) присоединяютъ постоянный элементъ E, электродвижущая сила котораго можетъ быть неизвѣстной, но во всякомъ случаѣ должна быть больше измѣряемаго напряженія x и электродвижущей силы E_0 нормальнаго элемента. Можно, напримѣръ, для E взять элементъ Бунзена, а для E_0 элементъ Даніеля. Гальванометръ, нормальный элементъ и регулировочное (балластное) сопротивленіе включены послѣдовательно въ цѣпь между началомъ проволоки A и скользящимъ контактомъ, и при томъ такимъ образомъ, что электродвижущія силы E и E_0 дѣйствуютъ другъ другу на встрѣчу. Скользящій контактъ перемѣщаютъ по AB до тѣхъ поръ, пока гальванометръ не покажетъ при замкнутомъ на короткое регулировочномъ сопротивленіи отсутствія тока. Пусть при этомъ положеніе контакта будетъ въ точкѣ C. Затѣмъ нормальный элементъ замѣняютъ неизвѣстнымъ, измѣряемымъ элементомъ, электродвижущая сила котораго x, при чемъ E и x необходимо, понятно, снова включать одно другому на встрѣчу. Пусть гальванометръ показываетъ теперь отсутствіе тока, тогда когда скользящій контактъ перемѣстится въ точку C'.



Фиг. 16.

Чтобы опредѣлить отношенія электродвижущихъ силъ E_0 и x по измѣреннымъ длинамъ AC и AC', замѣтимъ, что напряженіе у зажимовъ элемента Бунзена расходуется вдоль всей калибрированной проволоки. Посрединѣ проволоки, напримѣръ, будетъ половинное напряженіе, такъ какъ при однѣхъ и тѣхъ же силахъ тока напряженія пропорціональны сопротивленію. Поэтому напряженіе между A и C, и безъ включенія нижней вѣтви, относится къ напряженію между A и C', какъ длина проволоки AC къ длинѣ AC'. Пусть, теперь, напряженіе между AC уравновѣшивается непосредственно электродвижущею силою E_0, а напряженіе между A и C' электродвижущею силою x. Тогда, подставивъ вмѣсто напряженій соотвѣтствующія длины, получаемъ:

$$\frac{AC}{AC'} = \frac{E^0}{x} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ (15)$$

Этотъ методъ, дающій начинающему наглядную картину паденія напряженія вдоль сопротивленія, представляетъ наиудобнѣйшее средство для вывѣрки приборовъ, и можно сказать, что почти всѣ приборы вывѣряются [1]) именно по этому методу. Калиброванную проволоку замѣняютъ магазиномъ сопротивленій, электродвижущую силу E аккумуляторной батареей и въ качествѣ нормальнаго элемента берутъ элементъ Вестона (по схемѣ Reichsanstalt'a [2]).

Подобно предыдущему опредѣляется также и напряженіе y между точками A и B изъ уравненія:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{y}{E_0} .$$

При этомъ, конечно, необходимо имѣть въ виду, что y не электродвижущая сила верхняго элемента E, а только напряженіе его у зажимовъ. Элементъ E вѣдь не безъ тока, въ противоположность элементамъ E_0 и x, поэтому напряженіе у его зажимовъ y меньше электродвижущей силы на величину потери напряженія на внутреннее сопротивленіе.

10. Законъ Джоуля, электрическая работа и электрическая мощность.

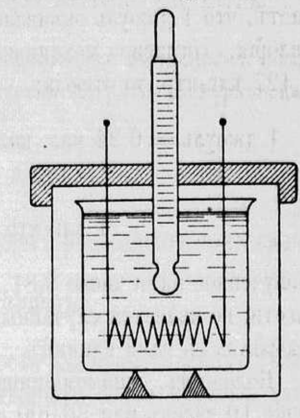
При прохожденіи тока черезъ проводникъ этотъ послѣдній нагрѣвается. Развиваемая при этомъ теплота была измѣрена англійскимъ физикомъ Джоулемъ, который установилъ ея зависимость отъ напряженія, силы тока и времени. Единицею количества теплоты въ электротехникѣ служитъ малая калорія, т. е. количество теплоты, которое повышаетъ температуру грамма воды отъ 0° до 1°, или, что практически то же самое, количество теплоты, нагрѣвающее граммъ воды на одинъ градусъ. Пусть Q_w обозначаетъ количество теплоты въ малыхъ калоріяхъ, e напряженіе у зажимовъ проводника въ вольтахъ, i силу тока въ амперахъ, t время въ секундахъ. Тогда изъ опыта имѣемъ:

$$Q_w = 0{,}24 e \cdot i \cdot t \text{ малыхъ калорій} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ (16)$$

[1]) Главнымъ образомъ вольтметры. Ред.

[2]) Германское правительственное учрежденіе, соотвѣтствующее Палатѣ мѣръ и вѣсовъ. Ред.

Этотъ опытъ можно легко продѣлать самому, погружая платиновую спираль (фиг. 17) вмѣстѣ съ припаянной къ ней мѣдной проволокой съ пренебрегаемымъ сопротивленіемъ въ нѣкоторое отмѣренное количество воды. Внутренній стеклянный сосудъ, содержащій воду, устанавливается на двухъ пробочныхъ призмахъ и, для уменьшенія по возможности потери теплоты, отдѣляется отъ внѣшняго сосуда воздушнымъ слоемъ. Черезъ спираль, затѣмъ, пропускаютъ токъ и замѣчаютъ повышеніе температуры $T_2 - T_1$, напряженіе, силу тока и время. Количество теплоты получится отъ перемноженія вѣса воды G въ граммахъ на повышеніе температуры $T_2 - T_1$. Находятъ, что это количество пропорціонально произведенію $e \cdot i \cdot t$:



Фиг. 17.

$$Q_w = G(T_2 - T_1) = c \cdot e \cdot i \cdot t.$$

При этомъ c равно 0,24. Хорошо этотъ опытъ заканчивать при температурѣ, настолько же градусовъ превышающей комнатную, насколько начальная была ниже этой послѣдней. Въ этомъ случаѣ во вторую половину опыта изнутри наружу переходитъ такое же количество теплоты, какое въ первую половину передавалось снаружи во внутрь, т. е. ошибки взаимно уничтожаются. Строго говоря, G представляетъ собою не только вѣсъ въ граммахъ воды, содержащейся въ стаканѣ, но и водяной эквивалентъ внутренняго стакана, опредѣляемый путемъ перемноженія вѣса стекла въ граммахъ на его теплоемкость, т. е. на 0,19.

Опытъ Джоуля является для электротехники настолько же основнымъ, насколько въ ученіи о теплотѣ опредѣленіе механическаго эквивалента теплоты, по которому большая калорія соотвѣтствуетъ 427 клг-мтр. Законъ Джоуля гласитъ, что произведеніе $e \cdot i \cdot t$ пропорціонально количеству теплоты. Такъ какъ теплота представляетъ собою не что иное, какъ особый видъ энергіи, то произведеніе $e \cdot i \cdot t$ есть также извѣстная форма энергіи: оно является, слѣдовательно, мѣрою для **электрической работы**.

Единица электрической работы затрачивается тогда, когда при напряженіи въ 1 вольтъ въ теченіе одной секунды поддерживается токъ силою въ 1 амперъ. Эту работу называютъ **джоулемъ** или **ваттъ-секундою**. Электрическая работа A опредѣляется тогда по формулѣ:

$$A = e \cdot i \cdot t \text{ джоулей} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (17)$$

Опредѣлимъ, теперь, соотношеніе между электрической работой въ джоуляхъ и механической работой въ килограммометрахъ. Для этого положимъ въ формулѣ, выражающей законъ Джоуля, e, i и $t = 1$; тогда работа будетъ равняться одному джоулю, а Q_w количество теплоты 0,24. Это означаетъ, что 1 джоуль эквивалентенъ 0,24 малой калоріи. Такъ какъ малая калорія, согласно механическому эквиваленту теплоты, эквивалентна 0,427 клг-мтр, то отсюда:

$$1 \text{ джоуль} = 0{,}24 \text{ мал. кал} = 0{,}24 \cdot 0{,}427 \text{ клг-мтр} = 0{,}102 \text{ клг-мтр}$$

или

$$1 \text{ клг-мтр} = 9{,}81 \text{ джоуля} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (18)$$

Полученное нами число 9,81, равное какъ разъ ускоренію отъ силы тяжести, не является случайнымъ совпаденіемъ: оно является слѣдствіемъ выбранныхъ нами единицъ.

Положимъ, динамомашина при 220 вольтахъ напряженія даетъ въ теченіе 10 часовъ или 36 000 секундъ, токъ въ 50 амперъ; тогда произведенная этимъ токомъ электрическая работа будетъ:

$$A = 220 \cdot 50 \cdot 36\,000 = 396 \cdot 10^6 \text{ джоулей},$$

что соотвѣтствуетъ $40{,}5 \cdot 10^6$ клг-мтр. Если элементъ Даніеля доставляетъ, напримѣръ, въ теченіе одного часа токъ въ 0,55 ампера при напряженіи у зажимовъ въ 1 вольтъ, то произведенная имъ электрическая работа A будетъ:

$$A = 1 \cdot 0{,}55 \cdot 3\,600 = 1\,980 \text{ джоулей}.$$

Эта работа соотвѣтствуетъ работѣ, затрачиваемой при поднятіи $\frac{1\,980}{9{,}81} \cong 200$ клг на высоту 1 мтр.

Изъ единицы работы вытекаетъ единица электрической мощности, т. е. работы, произведенной въ секунду. Если произведеніе $e \cdot i \cdot t$ представляетъ электрическую работу, то произведеніе $e \cdot i$ представитъ электрическую мощность. Слѣдовательно, единица электрической мощности доставляется амперомъ при напряженіи въ одинъ вольтъ. Эта единица электрической мощности называется ваттомъ. Обозначимъ черезъ P электрическую мощность въ ваттахъ; тогда

$$P = e \cdot i \text{ ваттъ} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (19)$$

Соотношеніе между ваттомъ и килограммометромъ въ секунду можно получить изъ равенства (18). 1 клг-мтр въ секунду равенъ 9,81 джоулей въ секунду или 9,81 ватта.

Откуда получаемъ:

$$1 \text{ лошадиная сила} = 75 \frac{\text{клг-мтр}}{\text{сек.}} = 75 \cdot 9{,}81 \text{ ватта} = 736 \text{ ваттъ}.$$

Такимъ образомъ, для 10-сильнаго электродвигателя съ полнымъ коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія 0,85 потребуется затрата электрической мощности

$$P = \frac{10 \cdot 736}{0{,}85} = 8\,700 \text{ ваттъ}.$$

При напряженіи въ 220 вольтовъ онъ будетъ расходовать токъ силы:

$$i = \frac{8\,700}{200} = \backsim 40 \text{ амперъ}.$$

Вышеуказанныя единицы работы и мощности для практическихъ цѣлей слишкомъ малы. Поэтому на практикѣ примѣняютъ болѣе крупныя единицы; именно:

1 гектоваттъ $= 100$ ваттъ.
1 киловаттъ $= 1\,000$ »
1 ваттъ-часъ $= 3\,600$ ваттъ-секундъ или джоулей.
1 киловаттъ-часъ $= 3{,}6 \cdot 10^6$ ваттъ-секундъ или джоулей.

11. Разность потенціаловъ.

Въ предыдущей статьѣ расчетъ электрической энергіи мы производили, основываясь на законѣ Джоуля, установленномъ опытнымъ путемъ; теоретическія основанія этого расчета мы считаемъ болѣе полезнымъ привести только теперь. Мы не разъ уже сравнивали электрическій токъ съ водяною струею. При разсмотрѣніи электрической работы сравненія подобнаго рода также являются не менѣе полезными. При стокѣ воды, умножая количество протекшей воды въ клг на высоту паденія въ мтр, получаемъ работу въ килограммометрахъ, произведеную въ теченіе извѣстнаго промежутка времени. Подобнымъ образомъ мы поступаемъ и при опредѣленіи электрической энергіи, составляя произведеніе $e \cdot i \cdot t$: e — напряженіе или разность уровней, а произведеніе $i \cdot t$ — количество электричества, которое въ теченіе времени t перетекаетъ съ высокаго уровна на низкій. Отсюда мы получаемъ болѣе точное опредѣленіе величины, обозначавшейся

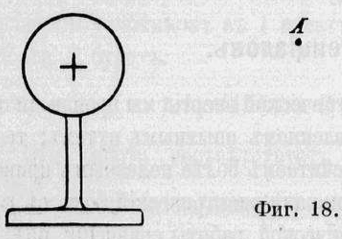
до сихъ поръ буквою e и называемой нами разностью уровней или напряженіемъ. Полагая въ формулѣ:

$$A = e \cdot i \cdot t$$

произведеніе $i \cdot t = 1$, то есть кулону, получимъ $A = e$. То есть, напряженіе e въ вольтахъ есть работа въ джоуляхъ, которая производится при переходѣ одного кулона съ высокаго на низкій уровень. Въ то время, когда этотъ кулонъ находится на высокомъ уровнѣ, онъ, подобно поднятому на высоту грузу, обладаетъ потенціальною энергіей (скрытою работоспособностью), которая тѣмъ болѣе, чѣмъ больше разность уровней. Поэтому и употребляютъ выраженіе «разность электрическаго потенціала» и опредѣляютъ послѣднюю, какъ работу, которая освобождается при переходѣ единицы положительнаго электричества съ высокаго уровня на болѣе низкій.

Мы могли бы и обратно опредѣлить разность потенціаловъ, какъ работу въ джоуляхъ, которую необходимо затратить на перемѣщеніе кулона положительнаго электричества съ низкаго уровня на высокій. Въ статьѣ 2 на электродвижущую силу какъ бы возлагалась задача обратнаго перемѣщенія электричества съ низкаго на высокій уровень. Слѣдовательно, электродвижущая сила и разность потенціаловъ или напряженіе до извѣстной степени представляютъ одно и то же и измѣряются одними и тѣми же единицами.

Высказанное выше опредѣленіе разности потенціаловъ тождественно съ опредѣленіемъ, которое извѣстно въ электростатикѣ. Пусть, напримѣръ, на фиг. 18 имѣется шаръ, который статически заряженъ положительнымъ электричествомъ. Пусть, кромѣ того, на внѣшней поверхности послѣдняго находится небольшое свободно перемѣщающееся тѣло, заряженное единицей положительнаго электричества. Послѣднее, въ виду того, что одноименныя электричества отталкиваются, будетъ удаляться отъ большого шара на безконечное разстояніе. При этомъ будетъ произведена либо механическая работа, либо небольшому тѣлу сообщится живая сила, которая равна суммѣ произведеній силы на путь, взятой по всей длинѣ. Потенціалъ на внѣшней поверхности, слѣдовательно, есть работа, которую производятъ электрическія силы, удаляя единицу положительнаго электричества на безконечное разстояніе.



Фиг. 18.

Небольшое тѣло, находясь въ A, по сравненію съ положеніемъ въ B, обладаетъ нѣкоторою работоспособностью, то есть потенціальной энергіей, подобно поднятому на высоту грузу. Слѣдовательно, потенціалъ въ A выше, чѣмъ въ B, то есть между обѣими точками существуетъ нѣкоторая разность потенціаловъ или уровней. Эта разность равна работѣ, которая освобождается при перемѣщеніи единицы положительнаго электричества отъ A до B.

Съ принципіальной точки зрѣнія безразлично, находится ли единица электричества, перемѣщающаяся отъ A къ B, на самомъ этомъ небольшомъ тѣлѣ и съ нимъ вмѣстѣ перемѣщается, или эта единица электричества, какъ это имѣетъ мѣсто въ электрическомъ токѣ, перемѣщается вдоль проводника. Необходимо при этомъ указать, что въ случаѣ, представленномъ на фиг. 18, для полученія разности потенціаловъ въ вольтахъ количество электричества слѣдуетъ выразить въ кулонахъ, а электрическую работу въ джоуляхъ.

12. Потеря энергіи на тепло Джоуля.

Представимъ выраженіе для электрической мощности, пользуясь равенствомъ $e = i \cdot w$, въ видѣ:

$$P = e \cdot i = i^2 \cdot w \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (20)$$

Такимъ образомъ, расходъ энергіи на полезное сопротивленіе, напримѣръ, на лампы, пропорціоналенъ квадрату силы тока и сопротивленію; то же самое имѣетъ мѣсто и въ проводахъ, доставляющихъ токъ. Этотъ законъ сыгралъ большую роль въ дѣлѣ развитія электротехники. Для уясненія, представимъ себѣ такой случай: предположимъ, что на разстояніе 30 клм необходимо передать 10 000 лошадиныхъ силъ. Мы можемъ эту мощность передавать или при сильномъ токѣ и небольшомъ числѣ вольтъ, или при слабомъ токѣ и большомъ числѣ вольтъ. Такимъ образомъ, при полной мощности въ 10 000 лошадиныхъ силъ или 7 360 000 ваттъ мы вообще имѣемъ:

$$i = \frac{P}{e} = \frac{7\,360\,000}{e}.$$

Полагая напряженія равными 100, 1 000 и 10 000 вольтъ, мы получимъ силы тока соотвѣтственно равными 73 600, 7 360 и 736 амперъ.

Допустимъ, теперь, потерю въ доставляющихъ токъ проводахъ въ 10%, то есть 736 000 ваттъ; тогда, обозначая сопротивленіе доставляющей токъ цѣпи черезъ w_l, получимъ:

$$i^2 \cdot w_l = 736\,000$$

или

$$w_l = \frac{736\,000}{i^2}.$$

Вся длина проводовъ будетъ $2 \cdot 30$ клм $= 60\,000$ мтр и, на основаніи равенства (6) на стр. 11, поперечное сѣченіе провода будетъ:

$$q = \frac{\rho \cdot l}{w_l}$$

или, подставляя значенія для ρ, l и w_l:

$$q = \frac{0{,}017 \cdot 60\,000}{\frac{736\,000}{i^2}} = 13{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot i^2.$$

Такимъ образомъ, поперечное сѣченіе мѣднаго провода прямо пропорціонально квадрату выбранной силы тока и обратно пропорціонально квадрату выбраннаго напряженія. На основаніи этого мы получаемъ слѣдующія значенія:

e	i	$q = 13{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot i^2$
100	73 600	$750 \cdot 10^4$ мм²
1 000	7 360	$750 \cdot 10^2$ »
10 000	736	$750 \cdot$ »

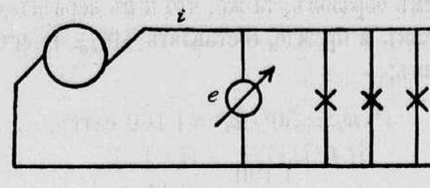
Ясно, что только послѣднія данныя являются наиболѣе пригодными для практики.

Выяснимъ теперь вліяніе высокаго напряженія на потери въ проводахъ, а также на поперечное сѣченіе мѣдной проволоки, пользуясь для этого трехпроводной системою. Положимъ, лампочка накаливанія устроена такимъ образомъ, что ея нормальное горѣніе будетъ имѣть мѣсто при 0,5 ампера, и сопротивленіе ея въ горячемъ состояніи равно 220 омамъ. Необходимое для ея горѣнія напряженіе у зажимовъ будетъ, слѣдовательно, $220 \cdot 0{,}5 = 110$ вольтъ. Положимъ, что всего требуется питать 200 лампъ на разстояніи 2 клм, причемъ потеря въ цѣпи должна составлять 10%. Требуется опредѣлить поперечныя сѣченія проводовъ при напряженіяхъ въ 110 и 220 вольтъ.

1 случай. Напряженіе 110 вольтъ. Всѣ лампы включены параллельно (фиг. 19).

При 200 лампахъ по 0,5 ампера, весь токъ $i = 0{,}5 \cdot 200 = 100$ амперъ. Полная передаваемая мощность:

$$P = e \cdot i = 110 \cdot 100 = 11\,000 \text{ ваттъ}.$$



Фиг. 19.

При 10% потерѣ въ проводахъ на нагрѣваніе израсходуется всего 1 100 ваттъ. Въ такомъ случаѣ, если w_l сопротивленіе проводовъ, имѣемъ:

$$i^2 \cdot w_l = 100^2 \cdot w_l = 1\,100$$

или

$$w_l = \frac{1\,100}{100^2} = 0{,}11 \text{ ома}.$$

Длина $l = 2 \cdot 2\,000$ мтр. $= 4\,000$ мтр.

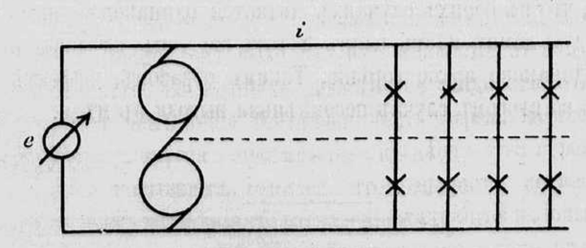
Изъ равенства:

$$w = \frac{\rho \cdot l}{q}$$

получаемъ:

$$q = \frac{\rho \cdot l}{w} = \frac{0{,}017 \cdot 4\,000}{0{,}11} = 620 \text{ мм}^2.$$

2 случай. Рабочее напряженіе равно 220 вольтамъ. Для этой цѣли включимъ послѣдовательно 2 машины въ 110 вольтъ каждая (фиг. 20).



Фиг. 20.

Если, затѣмъ, включимъ послѣдовательно по двѣ лампы, то каждая лампа получаетъ напряженіе въ 110 вольтъ. Тогда при 200 лампахъ имѣемъ только 100 отвѣтвленій по 0,5 ампера каждое, сила тока $i = 100 \cdot 0{,}5 = 50$ амперъ. Передаваемая мощность будетъ:

$$P = e \cdot i = 220 \cdot 50 = 11\,000 \text{ ваттъ}.$$

Мощность, такимъ образомъ, та же, что и въ первомъ случаѣ. Потери, понятно, должны, какъ и прежде, составлять 10%, то есть 1 100 ваттъ.

Отсюда получаемъ:

$$i^2 \cdot w_l = 50^2 \cdot w_l = 1\,100 \text{ ваттъ},$$

откуда

$$w_l = \frac{1\,100}{50^2} = 0{,}44 \text{ ома}$$

и

$$q = \frac{\rho \cdot l}{w_l} = \frac{0{,}017 \cdot 4\,000}{0{,}44} = 155 \text{ мм}^2.$$

Слѣдовательно, поперечное сѣченіе мѣдныхъ проводовъ при удвоеніи напряженія въ цѣпи уменьшилось въ 4 раза. Чтобы и во второмъ случаѣ возможно было всѣ лампы включать и выключать независимо другъ отъ друга, отъ средней точки соединенія между машинами къ точкамъ, лежащимъ посерединѣ между каждыми двумя лампами, проводятъ уравнительный или, такъ называемый, нулевой проводъ. Поперечное сѣченіе его обыкновенно вдвое меньше внѣшнихъ проводовъ, и, несмотря на три провода, въ этомъ случаѣ получается все же значительная экономія въ мѣди. Мы можемъ также сказать и наоборотъ, что при одномъ и томъ же поперечномъ сѣченіи мѣднаго провода и при одинаковыхъ процентахъ потери съ удвоеніемъ напряженія въ сѣти возможно передать въ 4 раза большую энергію.

Приведенный выше примѣръ расчлененъ, для начинающихъ, на два отдѣльныхъ случая съ цѣлью лучшаго уясненія преимуществъ передачи энергіи токомъ высокаго напряженія. Произведенныя вычисленія ясно показываютъ, что въ обоихъ случаяхъ питается одинаковое число лампъ и черезъ каждую лампу идетъ одинъ и тотъ же токъ, слѣдовательно, происходитъ одинаково яркое горѣніе. Такимъ образомъ, эффектъ одинъ и тотъ же, но во второмъ случаѣ несомнѣнная выгода въ мѣди.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

13. Химическіе процессы при электролизѣ.—14. Соотношеніе вѣсовъ при электролизѣ.—15. Поляризація.—16. Аккумуляторы.—17. Химическіе процессы въ элементахъ.—18. Вольтаметръ.

---

13. Химическіе процессы при электролизѣ.

Проводниками перваго класса называются проводники, которые при прохожденіи черезъ нихъ тока не измѣняютъ своего химическаго состава. Къ нимъ принадлежатъ металлы и уголь. Проводниками второго класса, наоборотъ, являются такіе, которые при прохожденіи черезъ нихъ тока химически измѣняются или разлагаются. Подобное разложеніе токомъ называютъ электролизомъ, а подвергающіеся дѣйствію тока проводники—электролитами. Къ этимъ послѣднимъ принадлежатъ основанія кислотъ и соли въ растворенномъ или расплавленномъ видѣ.

Аппаратъ, въ которомъ происходитъ процессъ разложенія, называютъ электролитической ванной, а погруженные въ жидкость проводники, чрезъ посредство которыхъ токъ входитъ въ электролитъ и уходитъ изъ этого послѣдняго—электродами. Положительный электродъ, у котораго токъ входитъ въ жидкость, называется анодомъ, отрицательный электродъ, по которому токъ выходитъ изъ жидкости, катодомъ.

Составныя части, на которыя разлагается жидкость, отлагаются на электродахъ, при чемъ одна составная часть перемѣщается вмѣстѣ съ токомъ къ катоду, а другая—противъ тока къ аноду. Эти перемѣщающіяся составныя части называютъ іонами, что означаетъ «странствующій». Согласно новѣйшимъ воззрѣніямъ, распаденіе жидкостей на іоны не происходитъ непосредственно подъ дѣйствіемъ электрическаго тока, но существуетъ

уже до того. Извѣстно, что давленіе, при которомъ вода проникаетъ черезъ полупроницаемую перегородку въ какой-нибудь растворъ, пропорціонально числу распавшихся молекулъ. Сильно разведенные растворы, которые въ одинаковыхъ объемахъ содержатъ одинаковое число молекулъ, обладаютъ одинаковымъ «осмотическимъ» давленіемъ, равнымъ образомъ одинаковымъ повышеніемъ точки кипѣнія и пониженіемъ точки замерзанія. Но странное отклоненіе отъ этого закона обнаруживаютъ электролиты. Такъ, напримѣръ, осмотическое давленіе соляной кислоты вдвое, а сѣрной кислоты втрое больше, чѣмъ можно было предполагать. Это на первый взглядъ непонятное явленіе геніально разрѣшилъ Arrhenius, высказавъ предположеніе, что у электролитовъ молекула распадается въ свою очередь на нѣсколько небольшихъ частицъ (іоны), которыя на осмотическое давленіе, повышеніе точки кипѣнія и повышеніе точки замерзанія оказываютъ то же вліяніе, что и обыкновенныя молекулы. Напримѣръ, молекула соляной кислоты (HCl) распадается на два іона: H и Cl, а молекула сѣрной кислоты на три: H, H и SO_4.

Проводимость электролита зависитъ отъ того, что іоны заряжены электричествомъ. Іоны, заряженные положительнымъ электричествомъ, называются катіонами. Они притягиваются (отрицательнымъ) катодомъ и потому движутся по положительному направленію тока и оставляютъ свой положительный зарядъ на катодѣ. Другіе, именуемые аніонами, заряжены отрицательнымъ электричествомъ и направляются противъ тока къ аноду, гдѣ отдаютъ свой отрицательный зарядъ. Впрочемъ, для начинающаго трудно согласовать это воззрѣніе съ общимъ господствующимъ представленіемъ, что электрическій токъ обусловливается перемѣщеніемъ только положительнаго электричества; поэтому лучше всего допустить существованіе этихъ обоихъ воззрѣній вмѣстѣ.

Для яснаго пониманія электролиза небезполезно было бы раньше всего указать на различіе между металлами и не-металлами или металлоидами. Металлы, какъ калій, магній, желѣзо, золото, узнаются по ихъ особому металлическому блеску; они хорошіе проводники теплоты и электричества, и соединенія ихъ съ водородомъ и кислородомъ даютъ основанія, напримѣръ, ѣдкій натръ ($NaOH$), ѣдкій калій (KOH), гашеная известь ($Ca[OH]_2$). Основной характеръ окиси металловъ проявляется въ томъ, что она окрашиваетъ красную лакмусовую бумагу въ синій цвѣтъ, дѣйствуетъ разъѣдающе, имѣетъ вкусъ щелочи и нейтрализуетъ кислоты. Во многихъ окислахъ металловъ основной характеръ проявляетъ свое дѣйствіе не такъ рельефно и обнаруживается лишь въ томъ, что эти окислы ослабляютъ кислоты или нейтрализуютъ ихъ.

Металлы, какъ они охарактеризованы выше, обнаруживаютъ въ растворѣ по отношенію къ электрическому току то свойство, что ихъ іоны постоянно перемѣщаются вмѣстѣ съ токомъ къ катоду. Они, такимъ образомъ, электроположительны, т. е. носители или перемѣстители положительнаго электричества (катіоны). Такъ какъ водородъ также перемѣщается вмѣстѣ съ токомъ къ катоду, то его тоже слѣдуетъ причислить къ металламъ, тѣмъ болѣе, что онъ можетъ быть замѣщенъ въ химическихъ соединеніяхъ металлами.

Къ не-металламъ или металлоидамъ относятся хлоръ, бромъ, іодъ, азотъ, кислородъ, сѣра и т. д., характеризующіеся отсутствіемъ металлическаго блеска. Металлоиды, встрѣчающіеся въ твердомъ видѣ, являются плохими проводниками тепла и электричества. Соединенія же ихъ съ водородомъ и кислородомъ образуютъ кислоты, напримѣръ, соляную кислоту (HCl), сѣрную кислоту (H_2SO_4), азотную кислоту (HNO_3), фосфорную кислоту (H_3PO_4). Кислоты характеризуются тѣмъ, что на вкусъ онѣ кислы, синюю лакмусовую бумагу окрашиваютъ въ красный цвѣтъ, растворяютъ металлы и нейтрализуютъ основанія, образуя соли.

Изъ металлоидовъ — хлоръ, бромъ, іодъ, фторъ перемѣщаются противъ тока; слѣдовательно, представляютъ собою аніоны; къ аніонамъ также принадлежитъ еще гидроксильная группа (OH) основаній, а также радикалы кислотъ (SO_4, PO_4, NO_3) и т. д.

Пояснимъ теперь процессы электролиза при помощи нѣкоторыхъ характерныхъ примѣровъ.

1. Электролизъ основаній.

При разложеніи ѣдкаго калія (KOH) металлъ калій перемѣщается вмѣстѣ съ токомъ и вызываетъ на катодѣ выдѣленіе водорода, согласно уравненію:

$$2K + 2H_2O = 2KOH + H_2.$$

Гидроксильная группа OH перемѣщается противъ тока и выдѣляетъ на анодѣ свободный кислородъ по уравненію:

$$4OH = 2H_2O + O_2.$$

Результатъ, такимъ образомъ, получается такой же, какъ будто бы разлагалась только вода, тогда какъ въ дѣйствительности разложенъ ѣдкій калій; химически же чистая вода не можетъ быть электролитомъ, такъ какъ она представляетъ собою совершенный изоляторъ.

2. *Электролизъ кислотъ.*

Самые простые процессы встрѣчаются при разложеніи соляной кислоты (HCl). При этомъ на катодѣ выдѣляется водородъ, а на анодѣ хлоръ, и мы имѣемъ здѣсь дѣло только съ первичнымъ процессомъ. При разложеніи сѣрной кислоты (H_2SO_4) на катодѣ выдѣляется также водородъ, кислотный же радикалъ SO_4, напротивъ, перемѣщается на анодъ и, если анодомъ служитъ уголь или платина, распадается по слѣдующему уравненію:

$$2SO_4 + 2H_2O = 2H_2SO_4 + O_2.$$

Такимъ образомъ, результатъ тотъ же, т. е. какъ будто разлагается только вода.

Если же анодъ состоитъ изъ мѣди, то группа SO_4 растворяетъ мѣдь по уравненію:

$$SO_4 + Cu = CuSO_4.$$

3. *Электролизъ солей.*

При разложеніи раствора хлористаго калія (KCl) вмѣстѣ съ токомъ къ катоду перемѣщается калій и тамъ образуется, какъ выше, ѣдкій калій. Хлоръ же, напротивъ, перемѣщается къ аноду. Если оба электрода раздѣлены діафрагмой, т. е. раздѣляющей перепонкой, напримѣръ пористымъ глинянымъ сосудомъ, то конечными продуктами являются ѣдкій калій и хлоръ. При работѣ безъ діафрагмы получающійся хлоръ дѣйствуетъ на ѣдкій калій и образуетъ при этомъ третичномъ процессѣ хлорноватистокислый калій ($KClO$) по уравненію:

$$2KHO + 2Cl = KClO + KCl + H_2O.$$

При горячемъ же растворѣ образуется хлорноватокислый калій ($KClO_3$) по уравненію:

$$6KHO + 6Cl = KClO_3 + 5KCl + 3H_2O.$$

Приведемъ еще примѣръ разложенія раствора соли, а именно электролизъ сѣрнокислой мѣди ($CuSO_4$). Сѣрнокислая окись мѣди или сѣрнокислая мѣдь разлагается электрическимъ токомъ такимъ образомъ, что вмѣстѣ съ токомъ къ катоду перемѣщается мѣдь и покрываетъ электродъ. Группа SO_4, наоборотъ, перемѣщается къ аноду. Если анодъ состоитъ изъ платины или угля, то освобождается, какъ раньше, кислородъ. Если же анодомъ является мѣдь, то она растворяется, при чемъ снова образуется сѣрнокислая мѣдь по уравненію.

$$Cu + SO_4 = CuSO_4.$$

14. Соотношеніе вѣсовъ при электролизѣ.

Выдѣлившееся на электродѣ вѣсовое количество элемента или химическаго соединенія, по опредѣленію Фарадея, пропорціонально силѣ тока и времени, то есть пропорціонально протекшему количеству электричества. Пусть:

m вѣсовое количество въ миллиграммахъ,
i сила тока въ амперахъ,
t время въ секундахъ,
c коэффиціентъ пропорціональности;

тогда опытъ намъ даетъ:

$$m = c \cdot i \cdot t.$$

Коэффиціентъ c у различныхъ іоновъ неодинаковъ. Изслѣдованія Фарадея показали, что онъ прямо пропорціоналенъ атомному вѣсу и обратно пропорціоналенъ атомности. Итакъ, если

a атомный вѣсъ,
k атомность,

то изъ опыта имѣемъ:

$$m = 0{,}010\,386 \frac{a}{k} \cdot i \cdot t \text{ мгр} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

Чтобы понять этотъ законъ, необходимо опредѣлить, что̀ такое атомный вѣсъ и что̀ такое атомность. Подъ атомнымъ вѣсомъ элемента подразумѣваютъ наименьшее вѣсовое количество его, вступающее въ химическое соединеніе съ другими элементами и отнесенное къ водороду. Такъ, напримѣръ, атомный вѣсъ хлора 35,4, такъ какъ соляная кислота (HCl) на одну часть водорода содержитъ 35,4 частей хлора. Вода содержитъ на одну вѣсовую часть водорода 8 вѣсовыхъ частей кислорода. Поэтому слѣдовало бы заключить, что атомный вѣсъ кислорода равенъ 8, какъ это и принимали раньше. Но при соблюденіи закона Авогадро, по которому вѣса объемовъ различныхъ газовъ пропорціональны вѣсамъ молекулъ, необходимо формулу воды написать въ видѣ H_2O. Отсюда слѣдуетъ, что на 2 атома водорода приходится 1 атомъ кислорода, и атомный вѣсъ послѣдняго необходимо принять 16, дабы получить соотношеніе 1:8=2:16. Помощью извѣстныхъ атомныхъ вѣсовъ и формулъ соединеній возможно вычислить, наоборотъ, сколько процентовъ даннаго элемента содержится въ извѣстномъ соединеніи. Поэтому ясно, что для опредѣленія выдѣлив-

шихся при электролизѣ вѣсовыхъ количествъ вещества на первомъ планѣ выступаетъ ихъ атомный вѣсъ.

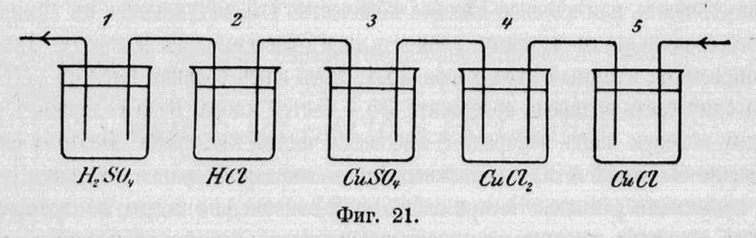
Согласно уравненію (21), необходимо разсмотрѣть еще атомность. Подъ атомностью или валентностью слѣдуетъ понимать количество атомовъ водорода, которое вступаетъ въ соединеніе или замѣщаетъ какой-либо элементъ. Такъ, напримѣръ, хлоръ одноатоменъ, ибо образуетъ соляную кислоту (HCl) съ однимъ атомомъ водорода. Калій также одновалентенъ, ибо образуетъ хлористый калій (KCl) съ одновалентнымъ хлоромъ, или потому, что въ хлористомъ каліи замѣщенъ одинъ атомъ водорода соляной кислоты. Съ другой стороны, кислородъ двувалентенъ, такъ какъ одинъ атомъ кислорода образуетъ воду (H_2O) съ двумя атомами водорода. Лучше всего представить себѣ эти соединенія въ видѣ черточекъ или связей, помощью которыхъ элементы какъ бы сцѣпляются другъ съ другомъ. Мѣдь, напримѣръ, у большинства своихъ соединеній двуатомна и потому сцѣпляется обѣими своими связями съ обѣими связями двувалентнаго атома кислорода и образуетъ окись мѣди по уравненію:

$$Cu + O = CuO.$$

Трехвалентный азотъ при образованіи амміака (NH_3) соединяетъ своими тремя связями три одновалентныхъ атома водорода и молекула амміака составляется по слѣдующей формулѣ:

$$N \begin{matrix} / H \\ - H \\ \backslash H. \end{matrix}$$

Послѣ всего вышесказаннаго мы теперь можемъ пояснить законъ Фарадея на простомъ примѣрѣ. Черезъ рядъ электролитическихъ ваннъ: съ сѣрной кислотой (H_2SO_4), соляной кислотой (HCl), мѣднымъ купоросомъ ($CuSO_4$), хлорной мѣдью ($CuCl_2$) и хлористой мѣдью ($CuCl$) (фиг. 21),



Фиг. 21.

пропускаемъ послѣдовательно, пользуясь платиновыми электродами, одинъ и тотъ же токъ. Затѣмъ предположимъ, что мы будемъ продолжать этотъ опытъ до тѣхъ поръ, пока въ первой ваннѣ не выдѣлится около 2 млг водорода. Тогда одновременно въ ваннахъ получатся вѣсовыя количества веществъ, представленныя въ нижеслѣдующей таблицѣ, гдѣ въ скобкахъ указаны атомные вѣса:

Въ первой ваннѣ (H_2SO_4):

2 млг водорода ($H = 1$), 16 млг кислорода ($O = 16$).

Во второй ваннѣ (HCl):

2 млг водорода ($H = 1$), 70,8 млг. хлора ($Cl = 35,4$)

Въ третьей ваннѣ ($CuSO_4$):

63,2 млг мѣди ($Cu = 63,2$), 16 млг кислорода ($O = 16$).

Въ четвертой ваннѣ ($CuCl_2$):

63,2 млг мѣди ($Cu = 63,2$), 70,8 млг хлора ($Cl = 35,4$).

До сихъ поръ все шло совершенно правильно, и тутъ прежде всего бросается въ глаза тотъ фактъ, что вѣсовыя количества какого-либо элемента при одномъ и томъ же токѣ и за одно и то же время выдѣляются въ одинаковомъ количествѣ, безразлично, изъ какого соединенія ни выдѣлять этотъ элементъ. Далѣе, оказывается, что соотношенія вѣсовыхъ количествъ прежде всего опредѣляются атомнымъ вѣсомъ. Во всѣхъ ваннахъ получается или чистый атомный вѣсъ или кратное его. Основываясь на этихъ фактахъ, можно было бы по вѣсовымъ количествамъ первой ванны тотчасъ же вычислить вѣсовыя количества въ слѣдующихъ трехъ ваннахъ. Однако при пятой ваннѣ мы встрѣтили бы затрудненіе. Намъ напередъ неизвѣстно, получимъ ли мы въ ней столько же мѣди, сколько въ третьей и четвертой ваннахъ, т. е. 63,2 млг—въ этомъ случаѣ въ соединеніи $CuCl$ одновременно выдѣлилось бы 35,4 млг хлора—или столько хлора, сколько во второй или четвертой ваннахъ, т. е. 70,8 млг, тогда мѣди въ ней выдѣлилось бы 126,4 млг. Опытъ подтверждаетъ второе предположеніе. Дѣйствительно, при электролизѣ раствора хлористой мѣди однимъ и тѣмъ же токомъ и за одно и то же время мѣди выдѣляется вдвое больше, чѣмъ изъ раствора хлорной мѣди.

Такъ какъ въ хлористой мѣди одинъ атомъ мѣди соединенъ съ однимъ атомомъ хлора, то мѣдь въ этомъ случаѣ одновалентна. Предположивъ же, что одинъ атомъ водорода вѣситъ 1 млг, мы въ первой ваннѣ отдѣлили бы въ общемъ отъ группы SO_4 два атома водорода, т. е. освободили бы двѣ связи или двѣ единицы сродства. Равнымъ образомъ находятъ, что и во всѣхъ остальныхъ ваннахъ въ каждой изъ нихъ освобождено по двѣ единицы сродства, или по двѣ связи. Такимъ образомъ приходимъ къ слѣдующему простѣйшему виду закона Фарадея: Одинъ и тотъ же токъ



разрушаетъ за одно и то же время всегда одинаковое число единицъ сродства.

Этому закону можно придать и другую форму. Вѣсовыя количества различныхъ элементовъ, получаемыя при раздѣленіи атомнаго вѣса на атомность, называютъ химическими эквивалентами. При равныхъ протекшихъ количествахъ электричества, вѣсовыя количества относятся между собою какъ химическіе эквиваленты, т. е. они химически эквивалентны. По новѣйшему же воззрѣнію, находящіеся въ жидкости въ свободномъ состояніи заряженные электричествомъ іоны приводятся въ движеніе электрическимъ токомъ и отдаютъ электродамъ свой положительный или отрицательный зарядъ. Они, такимъ образомъ, суть переносители электричества, и при этомъ эквивалентныя вѣсовыя количества переносятъ всегда и вездѣ одни и тѣ же количества электричества. Эквивалентныя вѣсовыя количества различныхъ іоновъ, такимъ образомъ, имѣютъ, какъ выражаются, равную вмѣстимость для электричества.

Вѣсовое же количество какого-либо элемента въ миллиграммахъ, выдѣленное однимъ амперомъ въ одну секунду, называютъ электрохимическимъ эквивалентомъ. Это можно вывести изъ уравненія (21) при помощи извѣстныхъ атомныхъ вѣсовъ и атомности. Такъ, электрохимическій эквивалентъ серебра при атомномъ вѣсѣ 107,6 и атомности 1 получается равнымъ:

$$\frac{0{,}010386 \cdot 107{,}6}{1} = 1{,}118 \text{ и мѣди } \frac{0{,}010386 \cdot 63{,}2}{2} = 0{,}328.$$

Можно точно также опредѣлить вѣсовыя количества водорода и кислорода, выдѣляемыя однимъ амперомъ въ одну секунду. При помощи удѣльныхъ вѣсовъ соотвѣтствующихъ газовъ опредѣляется выдѣлившійся объемъ газа: одинъ амперъ доставляетъ въ одну секунду 0,174 кб. см сухого гремучаго газа при температурѣ 0 градусовъ и 760 мм давленія.

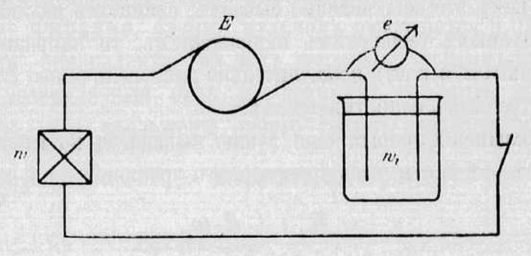
Что касается объемовъ водорода и кислорода, выдѣляющихся при электролизѣ, то они пропорціональны, согласно закону Авогадро, числу молекулъ. Такъ какъ у кислорода и водорода каждая молекула состоитъ изъ двухъ атомовъ, то объемы газовъ относятся, какъ числа атомовъ, слѣдовательно, согласно формулѣ H_2O, какъ 2:1.

15. Поляризація.

При электролизѣ разбавленной сѣрной кислоты между платиновыми электродами напряженіе у зажимовъ этой электрической ванны получается равнымъ 2—3 вольтамъ. Если приложить къ такой ваннѣ напряженіе меньшее предыдущаго, то вода въ этомъ случаѣ вовсе не будетъ разлагаться; если же приложить болѣе высокое E (фиг. 22), равное, напримѣръ, 10—20 вольтамъ, и включить при этомъ въ цѣпь промежуточное сопротивленіе w, то напряженіе у зажимовъ само собою установится равнымъ 2—3 вольтамъ. Сила же тока тогда получится изъ уравненія:

$$i = \frac{E - e}{w},$$

гдѣ E элоктродвижущая сила источника тока, а e напряженіе у зажимовъ электролитической ванны. Напряженіе это, какъ видно,—хотя оно приложено къ ваннѣ извнѣ ея, — является причиною, заставляющею токъ идти черезъ ванну, но величина его зависитъ все же отъ самой ванны. Оно является какъ бы функціей электролитической ванны, измѣнять его произвольно мы не можемъ; оно, напримѣръ, остается постояннымъ даже тогда,



Фиг. 22.

когда путемъ измѣненія E и w станемъ увеличивать силу тока. Оно остается также въ достаточной степени постояннымъ и при измѣненіи разстоянія между обоими электродами, т. е. при измѣненіи сопротивленія жидкости. Поэтому оно не можетъ выражаться, подобно напряженію на концахъ металлическаго сопротивленія, произведеніемъ изъ силы тока i на внутреннее сопротивленіе w_i. Въ дѣйствительности оно значительно больше того теоретическаго значенія, которое опредѣляется произведеніемъ силы тока на внутреннее сопротивленіе.

Это станетъ еще болѣе понятнымъ, когда мы увидимъ, что электролитическая ванна послѣ размыканія цѣпи главнаго тока будетъ посылать еще черезъ вольтметръ токъ. Въ этотъ моментъ ванна функціонируетъ, какъ источникъ тока, посылая послѣдній изъ того самаго зажима, черезъ который въ началѣ поступалъ токъ. Вышеуказанный токъ называютъ поляризаціоннымъ токомъ, а имѣющуюся при этомъ электродвижущую силу— электродвижущей силой поляризаціи. Послѣдняя дѣйствуетъ только то время, пока оба электрода покрыты пузырьками газа. Такимъ образомъ,

передъ нами въ этотъ моментъ элементъ, состоящій изъ водорода, сѣрной кислоты и кислорода, электродвижущая сила котораго направлена прямо противоположно первоначальному току.

Элементъ этотъ дѣйствовалъ уже и во время первоначальнаго тока. Напряженію у зажимовъ его предстояла двоякая задача: доставить электролитической ваннѣ небольшое расходуемое омическое напряженіе и преодолѣть электродвижущую силу поляризаціи E_1. Поэтому для напряженія у зажимовъ электролитической ванны мы можемъ написать слѣдующее уравненіе:

$$e = E_1 + i \cdot w_i.$$

Такимъ образомъ электродвижущую силу поляризаціи опредѣляютъ, какъ электродвижущую силу новаго элемента, образующагося въ электролитической ваннѣ вслѣдствіе химическаго измѣненія электродовъ. Если же поляризація, какъ это обыкновенно бываетъ, слишкомъ велика по сравненію съ расходуемымъ омическимъ напряженіемъ, то напряженіе у зажимовъ обусловливается почти исключительно лишь величиною E_1, а не силою тока или внутреннимъ сопротивленіемъ.

Законъ сохраненія энергіи еще лучше выясняетъ появленіе поляризаціи. Умноживъ обѣ части вышеприведеннаго уравненія на i, получаемъ

$$e \cdot i = E_1 \cdot i + i^2 \cdot w_i.$$

Въ послѣднемъ уравненіи произведеніе $e \cdot i$ представляетъ собою сообщенную электролитической ваннѣ энергію, а выраженіе $i^2 \cdot w_i$—расходъ энергіи въ жидкости на тепло Джоуля. Отсюда заключаемъ, что на разложеніе воды должна быть израсходована работа $E_1 \cdot i$. Дѣйствительность подтверждаетъ нашъ выводъ, такъ какъ образующійся гремучій газъ представляетъ собою накопленную работу или потенціальную энергію. Каждую минуту мы можемъ произвести взрывъ, и выдѣляющаяся при этомъ теплота или произведенная при этомъ работа равна работѣ, затраченной на разложеніе.

Накопленная въ гремучемъ газѣ энергія пропорціональна количеству образовавшагося гремучаго газа, т. е. пропорціональна протекшему количеству электричества при разложеніи воды. Если c коэффиціентъ пропорціональности, относящійся спеціально только къ гремучему газу, то накопленная работа выразится:

$$A = c \cdot i \cdot t.$$

Съ другой же стороны, затраченная на это электрическая работа будетъ:

$$A = E_1 \cdot i \cdot t.$$

Отсюда заключаемъ, что $E_1 = c$ или что электродвижущая сила одинаковыхъ электролитическихъ ваннъ имѣетъ всегда одно и то же постоянное значеніе c; при этомъ, понятно, всюду предполагается одинъ и тотъ же химическій составъ жидкости и электродовъ, т. е. одинаковый химическій составъ конечныхъ продуктовъ. Для ваннъ другого состава поляризація будетъ другая, такъ какъ ея величина опредѣляется энергіей сгоранія или величиной работы конечныхъ продуктовъ. Она, напримѣръ, при разложеніи сѣрнокислой мѣди при платиновыхъ электродахъ иная, чѣмъ при разложеніи сѣрной кислоты, такъ какъ въ первомъ случаѣ на катодѣ получаемъ мѣдь, а на анодѣ кислородъ. Но при сгораніи мѣди съ кислородомъ въ окись мѣди выдѣляющаяся теплота другая, чѣмъ при соединеніи эквивалентныхъ количествъ водорода и кислорода въ воду.

На основаніи этихъ фактовъ можно было бы попробовать напередъ вычислить электродвижущую силу поляризаціи.

По закону Фарадея, однимъ кулономъ разлагается $0{,}010\,386.10^{-3}$ кратное граммъ-эквивалента, гдѣ подъ терминомъ «граммъ-эквивалентъ» разумѣютъ, молекулярный вѣсъ въ граммахъ дѣленный на атомность. Слѣдовательно, для разложенія одного граммъ-эквивалента необходимо $\frac{1}{0{,}010386.10^{-3}}$ кулона, т. е. затратить электрическую работу:

$$E_1 . i \cdot t = \frac{E_1}{0{,}010\,386.10^{-3}}$$

Если черезъ x обозначимъ количество теплоты въ малыхъ калоріяхъ, которое наблюдается при образованіи одного граммъ-эквивалента, то, согласно закону Джоуля, соотвѣтствующая электрическая работа будетъ $x : 0{,}24$. Приравнявъ оба значенія этой работы, получаемъ:

$$\frac{E_1}{0{,}010\,386.10^{-3}} = \frac{x}{0{,}24}.$$

или

$$E_1 = \frac{x}{23\,000}.$$

Напримѣръ, имѣемъ такое уравненіе:

$$H_2 + O = H_2O + 68\,000$$

т. е. при образованіи граммъ-молекулы воды освобождается 68 000 малыхъ калорій.

При образованіи одного граммъ-эквивалента освобождается 34 000 малыхъ калорій. Поэтому электродвижущая сила поляризаціи при разложеніи воды будетъ:

$$E_1 = \frac{34\,000}{23\,000} = 1,47 \text{ вольта.}$$

Поэтому такимъ источникомъ тока, какъ, напримѣръ, элементъ Даніеля, нельзя разложить воду. Но при этомъ слѣдуетъ указать, что измѣренная въ дѣйствительности противо-электродвижущая сила значительно больше теоретическаго значенія ея. Поэтому всѣ предыдущія изслѣдованія имѣли своею цѣлью только аналитически изслѣдовать существеннѣйшую причину поляризаціи.

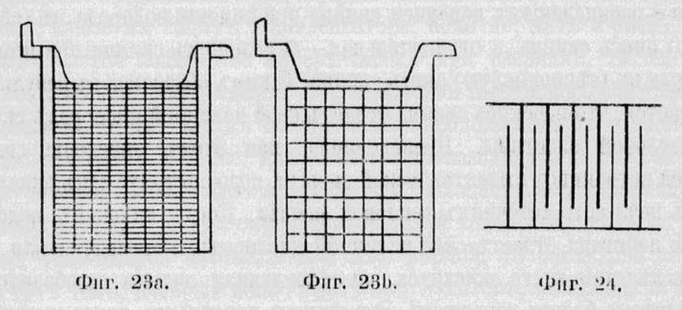
Въ заключеніе разсмотримъ еще одинъ случай, когда поляризація равна почти нулю, такъ какъ во время самого электрохимическаго разложенія, такъ и послѣ него, электроды остаются безъ измѣненія и конечные продукты не представляютъ собою запаса накопленной работы. Это имѣетъ мѣсто при разложеніи раствора сѣрнокислой мѣди при анодѣ изъ чистой мѣди; въ этомъ случаѣ химически чистая мѣдь осаждается на катодѣ, а на анодѣ растворяется. Оба электрода при этомъ остаются одного и того же химическаго состава,—они, такимъ образомъ, никогда не смогутъ образовать вмѣстѣ съ жидкостью элементъ. Поляризація въ этомъ случаѣ равна нулю, и напряженіе e у зажимовъ равно произведенію $i \cdot w_i$. Тотъ же результатъ получается также изъ положенія, что затраченнная работа на осажденіе мѣди на катодѣ равна работѣ, затраченной на разложеніе, т. е. работѣ, пріобрѣтенной при окисленіи мѣди на анодѣ; разложеніе, слѣдовательно, въ этомъ случаѣ идетъ самостоятельно, безъ всякой затраты работы.

16. Аккумуляторы [1]).

Первые аккумуляторы устраивались по способу Планте такимъ образомъ, что разбавленная сѣрная кислота разлагалась между двумя сплошными свинцовыми листами, служащими электродами, при чемъ свинцовые листы съ поверхности измѣнялись, т. е. формировались. Для увеличенія мощности стали затѣмъ, согласно системѣ Фора, употреблять желобчатыя или рѣшетчатыя пластины, покрытыя сурикомъ, окисью свинца или мелко раздробленнымъ металлическимъ свинцомъ. Въ настоящее время въ качествѣ положительныхъ пластинъ употребляютъ часто пластины съ большою поверхностью

[1]) См. соотвѣтствующую статью въ Heim, Die Einrichtung von elektrischen Beleuchtungsanlagen für Gleichstrombetrieb. 4 Aufl. 1903.

(фиг. 23a); онѣ приготовляются изъ свинца, и рѣшетка ихъ состоитъ изъ большого числа узкихъ отверстій. Такого рода пластины представляютъ воздѣйствію жидкости большую поверхность. На фабрикахъ, путемъ примѣненія сѣрной кислоты съ химическими примѣсями, онѣ формируются въ теченіе небольшого промежутка времени посредствомъ сильнаго тока, т. е. измѣняются съ поверхности въ перекись свинца. Отрицательныя пластины (фиг. 23b) также состоятъ изъ свинцовыхъ рѣшетокъ, но съ болѣе значительными отверстіями, покрытыми глетомъ, т. е. окисью свинца. Эти пластины употребляются необработанными и по установкѣ батареи переводятся въ первые непрерывные 40 часовъ зарядки въ металлическій свинецъ. Сборка аккумуляторовъ происходитъ слѣдующимъ образомъ: пластины, при помощи имѣющихся у нихъ приливовъ, подвѣшиваются къ краямъ стеклянныхъ сосудовъ, и одноименныя пластины одного элемента спаиваются свинцовыми полосами другъ съ другомъ (фиг. 24).



Фиг. 23a. Фиг. 23b. Фиг. 24.

Для уясненія работы аккумулятора предположимъ, что послѣдній, согласно способу Планте, состоитъ изъ чистыхъ свинцовыхъ листовъ. Поэтому мы должны сначала разсматривать его, какъ электролитическую ванну, въ которой сѣрная кислота разлагается между свинцовыми электродами. На отрицательной пластинѣ освобождается тогда водородъ, при чемъ отрицательная пластина въ этомъ случаѣ остается безъ измѣненія. На положительномъ же листѣ, напротивъ, выдѣляется свободный кислородъ, образующій съ свинцомъ коричневую перекись свинца (PbO_2). Но тогда въ электролитической ваннѣ мы получаемъ элементъ, состоящій изъ свинца, сѣрной кислоты и перекиси свинца, электродвижущая сила котораго составляетъ 2 вольта. Послѣдняя дѣйствуетъ уже во время прохожденія тока, т. е. во время зарядки, оказывая какъ бы сопротивленіе току или напряженію у зажимовъ.—Если выключить батарею отъ источника тока и соединить зажимы батареи при помощи какого-либо сопротивленія, то при разряженіи токъ пойдетъ изъ того же самаго зажима, въ который онъ посту-

палъ при зарядкѣ. Положительный зажимъ при зарядкѣ опять явится положительнымъ зажимомъ при разрядкѣ. Положительнымъ зажимомъ **электролитической ванны** называютъ тотъ, черезъ который токъ входитъ, а у **источника тока** тотъ, по которому токъ выходитъ.

При разрядкѣ происходитъ слѣдующій процессъ:

	$+$		$-$
Состояніе до разрядки:	PbO_2	H_2SO_4	Pb
Направленіе тока въ ваннѣ:	$\longleftarrow$		
Направленіе перемѣщенія іонъ:	$H_2 \longleftarrow$		$\longrightarrow SO_4$
Реакція на электродахъ:	$PbO_2 + H_2 + H_2SO_4$ $= PbSO_4 + 2H_2O$		$Pb + SO_4$ $= PbSO_4$
Окончательный продуктъ послѣ разрядки:	$PbSO_4$		$PbSO_4$

Итакъ, обѣ пластины переходятъ въ сѣрнокислый свинецъ: положительная—раскисленіемъ перекиси свинца при помощи водорода въ (сѣрнокислую) окись свинца, а отрицательная—окисленіемъ свинца при помощи кислорода въ (сѣрнокислую) окись свинца. Такимъ образомъ, въ результатѣ оказывается, что перекись свинца отдаетъ свой излишній кислородъ свинцу отрицательной пластины. Происходящее при этомъ окисленіе свинца является источникомъ электрической энергіи, подобно тому, какъ окисленіе угля въ печи есть источникъ тепловой энергіи. Когда, наконецъ, положительная пластина отдастъ свой излишній кислородъ, и отрицательная пластина вслѣдствіе этого окислится, то накопленная энергія освободится, и аккумуляторъ будетъ разряженъ. Это станетъ понятнымъ, когда замѣтимъ, что въ этомъ случаѣ обѣ пластины стали химически одинаковыми, т. е. не могутъ образовать никакого источника тока или элемента. Конечно, нельзя, не упомянуть, что во время процесса окисленія и раскисленія измѣненіе концентраціи кислоты также принимаетъ участіе въ образованіи энергіи. Удѣльный вѣсъ кислоты во время разрядки уменьшается.

Разрядившійся аккумуляторъ снова разсматриваютъ, какъ электрическую ванну, т. е. его снова заряжаютъ. При этомъ происходитъ слѣдующій процессъ:

	$+$		$-$
Состояніе до зарядки:	$PbSO_4$	H_2SO_4	$PbSO_4$
Направленіе тока въ ваннѣ:			$\longrightarrow$
Направленіе перемѣщенія іонъ:	$SO_4 \longleftarrow$		$\longrightarrow H_2$
Химическія реакціи:	$PbSO_4 + SO_4 + 2H_2O$ $= PbO_2 + 2H_2SO_4$		$PbSO_4 + H_2$ $= H_2SO_4 + Pb$
Конечные продукты послѣ зарядки:	PbO_2		Pb

На положительной пластинѣ опять образовалась перекись свинца, на отрицательной—металлическій свинецъ, и электрическая ванна снова становится источникомъ тока, т. е. элементомъ. Кромѣ того на обѣихъ пластинахъ освободилась сѣрная кислота, вслѣдствіе чего удѣльный вѣсъ кислоты увеличился.

Итакъ, мы видимъ, что процессъ при зарядкѣ состоитъ не въ накопленіи электричества, какъ это имѣетъ мѣсто въ конденсаторѣ, но въ химическомъ преобразованіи, такъ называемыхъ, активныхъ массъ. Если говорятъ о **емкости** аккумулятора, то подъ этимъ разумѣютъ нѣчто другое, чѣмъ емкость конденсатора. Емкость конденсатора это—количество электричества, накопляющееся въ конденсаторѣ при единицѣ напряженія его и отдаваемое имъ вновь при разрядкѣ его, подъ емкостью же аккумулятора понимаютъ количество электричества въ амперъ-часахъ, приводящееся въ движеніе при разрядкѣ его. Въ этомъ случаѣ о томъ накопленіи, какое мы видимъ у конденсатора, понятно, нѣтъ и рѣчи.

Что касается количества амперъ-часовъ при разрядкѣ, то въ принципѣ безразлично, производится ли разрядка въ теченіе короткаго времени при сильномъ токѣ, или въ теченіе болѣе продолжительнаго времени—при слабомъ токѣ, а также, какою силою производилась до того зарядка. Аккумуляторъ, подобно элементу **Даніеля**, обладаетъ опредѣленной электродвижущей силой, но не опредѣленной силой тока. Если тѣмъ не менѣе таковая указывается поставляющей ихъ фирмой, то послѣдняя не означаетъ тотъ токъ, который можетъ дать аккумуляторъ, а также и не максимальный токъ, вообще возможный въ немъ. Въ этомъ случаѣ подъ нимъ разумѣютъ лишь тотъ предѣльный токъ, котораго не должно превышать, дабы не выпадала изъ пластинъ активная масса, и пластины не искривлялись. **Поэтому силу тока при разрядкѣ можно выбирать большей или меньшей между установленными практикой предѣлами** соотвѣтственно чему получается болѣе длинное или короткое время разрядки. Емкость при этомъ теоретически должна оставаться безъ измѣненія, такъ какъ произведеніе $i \cdot t$, согласно закону **Фарадея**, пропорціонально количеству преобразованной активной массы.

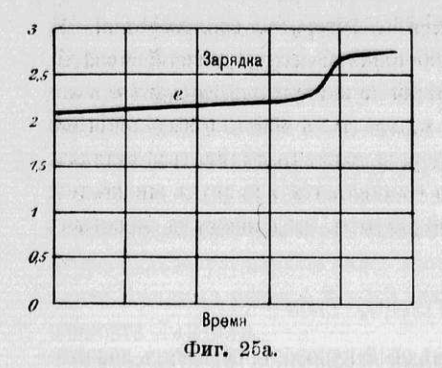
На практикѣ получается другое: емкость при разрядкѣ сильнымъ токомъ значительно меньше емкости при разрядкѣ слабымъ токомъ. Это объясняется просто тѣмъ, что активная масса при сильномъ токѣ измѣняется лишь съ поверхности и только частью участвуетъ во всемъ процессѣ.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія аккумулятора есть отношеніе амперъ-часовъ при разрядкѣ къ амперъ-часамъ при зарядкѣ. Теоретически это отношеніе должно было бы быть равно 1, такъ какъ зарядка и раз-

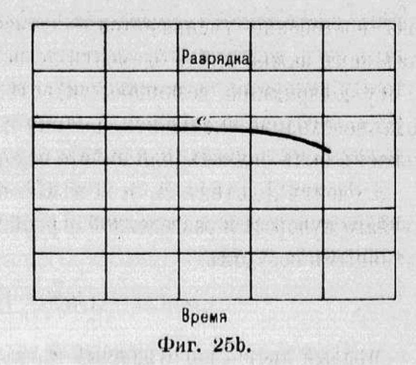
рядка состоятъ въ образованіи и въ разрушеніи активной массы, и приведенныя въ движеніе электричества пропорціональны количеству преобразованной активной массы. Если же между зарядкой и разрядкой проходитъ довольно продолжительное время, то аккумуляторъ немного разряжается вслѣдствіе не вполнѣ совершенной изоляціи. Къ этому еще присоединяется потеря заряда, вызываемая мѣстными токами на одной и той же пластинѣ, образующимися вслѣдствіе нечистой кислоты, несовершенной зарядки пластины и неодинаковой концентраціи кислоты. И, наконецъ, часть амперъ-часовъ, затраченныхъ на зарядку, расходуется безполезно на выдѣленіе газовъ, ибо въ концѣ зарядки, когда большая часть активной массы уже преобразована, водородъ и кислородъ не могутъ полностью реагировать на пластины и начинаютъ выдѣляться. Отсюда получаемъ, что коэффиціентъ полезнаго дѣйствія въ амперъ-часахъ меньше 1. Тѣмъ не менѣе онъ сравнительно высокъ, по большей части превышаетъ величину 0,9 и при соотвѣтствующей установкѣ опыта получается почти равнымъ 1.

При опредѣленіи коэффиціента полезнаго дѣйствія въ амперъ-часахъ, конечно, многое зависитъ отъ того, когда прекращаютъ зарядку или разрядку. Зарядку обыкновенно продолжаютъ до тѣхъ поръ, пока активная масса почти совершенно не преобразуется съ поверхности, т. е. до «кипѣнія» аккумулятора (выдѣленія газовъ), при чемъ напряженіе вслѣдствіе осаждающихся на электродахъ пузырьковъ газа достигаетъ 2,6—2,7 вольта. Разрядку прекращаютъ тогда, когда напряженіе вслѣдствіе увеличивающагося внутренняго сопротивленія, состоящаго, главнымъ образомъ, изъ сопротивленія при переходѣ тока въ сѣрнокислый свинецъ, понизится до 1,8 вольта. Это конечное значеніе 1,8 вольта соотвѣтствуетъ только моменту конца разрядки при нормальной силѣ тока, но не періоду послѣ разрядки, ибо, хотя нормально разряженный аккумуляторъ въ концѣ разрядки и показываетъ напряженіе у зажимовъ въ 1,8 вольта, но на самомъ дѣлѣ все же обладаетъ электродвижущей силой въ 2 вольта. Это видно изъ того, что напряженіе у зажимовъ послѣ размыканія повышается до 2 вольтъ. Слѣдовательно, на практикѣ разрядка аккумулятора происходитъ неполная. Но дальнѣйшая разрядка повредила бы пластинамъ и практически не имѣла бы значенія, ибо напряженіе при этомъ быстро падаетъ до нуля.

Для практическихъ цѣлей болѣе важнымъ, чѣмъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія въ амперъ-часахъ, является коэффиціентъ полезнаго дѣйствія въ ваттъ-часахъ. Для опредѣленія послѣдняго разсмотримъ напряженіе у зажимовъ во время зарядки и разрядки, и нанесемъ время



Фиг. 25a.



Фиг. 25b.

по оси абсциссъ, а напряженіе у зажимовъ по оси ординатъ, фиг. 25a и 25b. Мы увидимъ тогда, что среднее напряженіе при зарядкѣ больше средняго напряженія при разрядкѣ. При зарядкѣ напряженіе у зажимовъ получится изъ слѣдующаго уравненія:

$$e = E_1 + i \cdot w_i,$$

при разрядкѣ же:

$$e = E_1 - i \cdot w_i.$$

Такимъ образомъ, среднее напряженіе у зажимовъ при разрядкѣ на двойную внутреннюю потерю напряженія меньше, чѣмъ среднее напряженіе у зажимовъ при зарядкѣ, не говоря уже о томъ, что электродвижущая сила при разрядкѣ меньше, чѣмъ увеличенная выдѣленіемъ газовъ электродвижущая сила при зарядкѣ. Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія въ ваттъ-часахъ меньше коэффиціента полезнаго дѣйствія въ амперъ-часахъ, т. е. равняется 0,8 : 0,9, такъ какъ къ вышеупомянутымъ потерямъ присоединяется еще потеря на тепло Джоуля.

17. Химическіе процессы въ элементахъ.

Простѣйшій элементъ состоитъ изъ мѣди и цинка въ разбавленной сѣрной кислотѣ, при чемъ мѣдь оказывается заряженной положительно, а цинкъ отрицательно. При соединеніи обоихъ зажимовъ проводникомъ получается токъ направленія внѣ элемента отъ мѣди къ цинку, а внутри—отъ цинка къ мѣди. Сѣрная кислота при этомъ разлагается и водородъ направляется вмѣстѣ съ токомъ къ мѣди, гдѣ осаждается въ видѣ пузырьковъ. Благодаря этому, создается новый элементъ, состоящій изъ водорода, сѣрной кислоты и цинка, электродвижущая сила котораго направлена прямо противоположно силѣ первоначальнаго элемента. Вслѣдствіе этого сила

тока постепенно уменьшается;—элементъ, говорятъ, поляризуется. Но такъ какъ важно имѣть элементъ съ постоянной электродвижущей силой, то эту поляризацію, возникающую вслѣдствіе присутствія свободнаго водорода, необходимо уменьшить, поэтому водородъ въ моментъ выдѣленія его долженъ быть связанъ, или вмѣсто водорода долженъ выдѣляться металлъ.

Элементъ Даніеля съ этой цѣлью составляется изъ двухъ жидкостей: мѣднаго купороса и разведенной сѣрной кислоты, раздѣленныхъ пористымъ глинянымъ сосудомъ:

$$+Cu - CuSO_4 \,||\, H_2SO_4 - Zn -.$$

Мѣдный листъ, погруженный въ мѣдный купоросъ, образуетъ положительный полюсъ, цинковый листъ, погруженный въ сѣрную кислоту, отрицательный полюсъ. Цинкъ амальгамированъ, чтобы не растворялся сѣрной кислотою во время бездѣйствія элемента. Токъ, образуемый элементомъ, идетъ въ немъ отъ цинка къ мѣди; при этомъ водородъ сѣрной кислоты проникаетъ сквозь глиняный сосудъ и осаждаетъ на мѣдномъ электродѣ мѣдь согласно уравненію:

$$H_2 + CuSO_4 = Cu + H_4SO_4.$$

Цинкъ, наоборотъ, группою SO_4, которая перемѣщается противъ тока, переводится въ сѣрнокислый цинкъ ($ZnSO_4$) и выдѣляетъ при этомъ, такъ какъ происходитъ, окислительный процессъ, нѣкоторую энергію, соотвѣтствующую работѣ тока. Послѣдняя заключаетъ въ себѣ работу во внѣшней цѣпи, работу на тепло Джоуля въ элементѣ и на осажденіе мѣди Можно электрическую энергію, доставляемую элементомъ, разсматривать еще проще, какъ разность между энергіей, выдѣлившейся при раствореніи цинка, и энергіей затраченной на осажденіе мѣди.

Такъ какъ электроды, какъ это видно, остаются неизмѣнными, то поляризаціи не происходитъ и электродвижущая сила постоянно равна 1,07 вольта; при этомъ предполагается, что имѣютъ дѣло съ химически чистыми веществами. Сила тока колеблется въ зависимости отъ внѣшняго сопротивленія. Если внутреннее сопротивленіе, соразмѣряющееся съ величиною элемента, принять въ среднемъ равнымъ 0,5 ома, то при замыканіи на короткое черезъ элементъ прошелъ бы токъ въ $1{,}07 : 0{,}5 = 2{,}14$ ампера.

Элементъ Бунзена состоитъ изъ угля въ концентрированной азотной кислотѣ и цинка въ разведенной сѣрной кислотѣ. Жидкости разъединены пористой перегородкой:

$$+C - HNO_3 \,||\, H_2SO_4 - Zn -$$

Уголь положительный полюсъ, цинкъ отрицательный. Процессъ въ сѣрной кислотѣ таковъ же, что въ элементѣ Даніеля. Перемѣщаемый токомъ водородъ, въ этомъ случаѣ, соединяется на углѣ съ кислородомъ азотной кислоты по уравненію:

$$3H_2 + 2HNO_2 = 2NO + 4H_2O.$$

Освобождающаяся при этомъ закись азота (NO) окисляется на воздухѣ въ бурую сильно удушливую окись азота (NO_2). Электродвижущая сила элемента Бунзена равна 1,8÷1,9 вольта. Внутреннее сопротивленіе меньше элемента Даніеля.

Элементъ съ хромовой кислотой состоитъ изъ угля и цинка въ растворѣ разведенной сѣрной кислоты и двухромокислаго калія K_2CrO_4, CrO_3):

$$+C - H_2SO_4,\quad K_2CrO_4,\quad CrO_3 - Zn -$$

Элементъ не имѣетъ глинянаго сосуда. Уголь—положительный полюсъ. Группа SO_4 растворяетъ цинкъ, и водородъ на углѣ соединяется съ кислородомъ двухромокислаго калія. Главною составною частью въ этомъ элементѣ является хромовая кислота CrO_3, возстанавливаемая водородомъ въ окись хрома по уравненію:

$$2CrO + 3H_2 = Cr_2O_3 + 3H_2O.$$

Красный до того цвѣтъ хромовой кислоты переходитъ при этомъ въ зеленый цвѣтъ сѣрнокислой окиси хрома, образующейся изъ сѣрной кислоты и окиси хрома. Электродвижущая сила, бывшая вначалѣ въ 2 вольта, при этомъ понижается. Этотъ элементъ, такимъ образомъ, при болѣе или менѣе сильномъ и продолжительномъ расходѣ тока не совсѣмъ постояненъ.

Элементъ Лекланше состоитъ изъ цинка и угля, погруженныхъ въ растворъ нашатыря:

$$+C - NH_4Cl - Zn -$$

При разложеніи нашатыря хлоръ перемѣщается къ цинку и растворяетъ его въ хлористый цинкъ. Это явленіе очень сходно съ окислительнымъ процессомъ и является источникомъ доставляемой элементомъ энергіи. Группа NH_4, замѣщающая металлъ, перемѣщается вмѣстѣ съ токомъ къ углю и тутъ распадается на амміакъ и водородъ по уравненію:

$$2NH_4 = 2NH_3 + H.$$

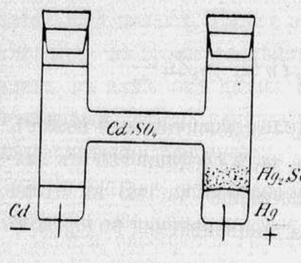
Выдѣляющійся водородъ поляризовалъ бы элементъ, если бы онъ не соединялся съ окружающею уголь перекисью марганца.

Перекись марганца (MnO_2)—очень богатая кислородомъ, отдаетъ свой кислородъ водороду съ образованіемъ окиси марганца (Mn_2O_3) по уравненію:

$$2MnO_2 + H_2 = Mn_2O_3 + H_2O.$$

Въ противоположность жидкой азотной кислотѣ или хромовой кислотѣ, перекись марганца иногда не въ состояніи бываетъ быстро связать выдѣляющійся водородъ. Вслѣдствіе этого электродвижущая сила его только во время бездѣйствія элемента равна 1,4 вольта, а во время работы понижается. Этотъ элементъ также не совсѣмъ постояненъ.

Элементъ Вестона[1]) (фиг. 26) состоитъ изъ стекляннаго сосуда въ видѣ буквы H, въ который впаяны двѣ платиновыя проволоки; положительнымъ электродомъ его является ртуть (Hg), отрицательнымъ кадмій (Cd) или, вѣрнѣе, амальгама кадмія съ 12—13% чистаго кадмія. Жидкостью служитъ концентрированный растворъ сѣрнокислаго кадмія ($CdSO_4$), крѣпость котораго постоянно поддерживается спеціально прибавляемыми кристаллами сѣрнокислаго кадмія. При прохожденіи тока кадмій перемѣщается вмѣстѣ съ токомъ; онъ соединялся бы на положительномъ электродѣ съ ртутью, вслѣдствіе чего оба электрода становились бы все болѣе и болѣе одинаковыми, и электродвижущая сила уменьшилась бы. Но надъ ртутью имѣется смѣсь изъ сѣрнокислой ртути (Hg_2SO_4), кристалловъ сѣрнокислаго кадмія и металлической ртути. Іоны кадмія даютъ съ сѣрнокислою ртутью маталлическую ртуть и сѣрнокислый кадмій по уравненію:



Фиг. 26.

$$Cd + Hg_2SO_4 = CdSO_4 + 2Hg.$$

Слѣдовательно, положительный электродъ остается такимъ же, какимъ былъ, т. е. металлическою ртутью, благодаря чему поляризація избѣгается. На отрицательномъ электродѣ кадмій, конечно, растворится группою SO_4.

Электродвижущая сила постоянно равна 1,019 вольта. Элементъ этотъ конечно, можетъ доставлять только совсѣмъ слабые токи и примѣняется, слѣдовательно, только для компенсаціонныхъ методовъ. Почти всѣ измѣрительные инструменты вывѣряются при помощи этого нормальнаго элемента.

[1]) Ср. Wiedemansche Annalen 1898. Стр. 126.

18. Вольтаметръ[1]).

Установленное закоположеніями опредѣленіе силы тока производится при помощи серебрянаго вольтаметра. Катодомъ служитъ платиновый тигель съ растворомъ изъ 20—40 вѣсовыхъ частей азотнокислаго серебра ($AgNO_3$) въ 100 частяхъ воды, анодомъ чистое серебро. Растворъ употребляется лишь до тѣхъ поръ, пока на 100 куб. см. раствора выдѣлятся 3 гр. серебра, а на катодѣ на квадратный сантиметръ осаждается не болѣе 0,1 гр. серебра. Плотность тока на анодѣ должна быть не болѣе одной пятой ампера, а на катодѣ не должна превышать одной пятидесятой ампера на квадратный сантиметръ. Тигель передъ испытаніемъ взвѣшивается и послѣ испытанія промывается дистиллированной, не содержащей хлора, водой до тѣхъ поръ, пока промывныя воды отъ прибавленія соляной кислоты не перестанутъ давать мути. Соляная кислота съ растворомъ серебра образуетъ нерастворимое хлористое серебро по уравненію:

$$HCl + AgNO_3 = AgCl + HNO_3.$$

Послѣ этого тигель въ продолженіе 10 минутъ выщелачивается дистиллированной водой въ 70—90° и еще разъ промывается, пока промывныя воды съ соляной кислотой совершенно не перестанутъ давать осадка. Затѣмъ высушиваютъ тигель, умѣренно нагрѣвая его, охлаждаютъ въ эксикаторѣ, и спустя 10 минутъ послѣ охлажденія взвѣшиваютъ.

При выполненіи вольтаметрическихъ измѣреній слѣдуетъ избѣгать прикосновенія рукою къ внутренней поверхности тигля, такъ какъ при этомъ осадокъ пристаетъ къ тиглю. До испытанія рекомендуется тигель прокалить концомъ безцвѣтнаго пламени бунзеновской горѣлки для уничтоженія возможныхъ загрязненій органическаго происхожденія.

Не слѣдуетъ также сильно накаливать содержащій серебро тигель, ибо въ такомъ случаѣ серебро вмѣстѣ съ платиной образуетъ легкоплавкую смѣсь; не слѣдуетъ тигель подвергать дѣйствію также нижней холодной части бунзеновскаго пламени или вводить въ свѣтящееся бунзеновское пламя, такъ какъ при этомъ образуется углеродистая платина, вслѣдствіе чего тигель становится хрупкимъ.

Обозначая:

m_1 вѣсъ тигля въ миллиграммахъ до взвѣшиванія,

m_2 » » » » послѣ взвѣшиванія,

t время въ секундахъ,

[1]) См. статьи Германскаго Законоположенія ETZ. 1901. Стр. 435.

получаемъ, такъ какъ одинъ амперъ въ 1 секунду осаждаетъ 1,118 млг. серебра:

$$i = \frac{m_2 - m_1}{1{,}118 \cdot t} \text{ амперъ.}$$

Что касается мѣднаго вольтаметра и вольтаметра съ гремучимъ газомъ, то они, конечно, приспособлены для болѣе сильныхъ токовъ, но даютъ менѣе вѣрные результаты. Они должны, поэтому, разсматриваться, какъ приборы, служащіе только для лабораторныхъ практическихъ занятій.

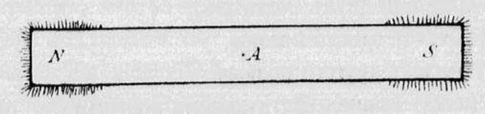
ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

19. Магнитная масса. — 20. Напряженіе магнитнаго поля. — 21. Магнитныя силовыя линіи.—22. Магнитный потенціалъ.—23. Желѣзо въ магнитномъ полѣ.—24. Земной магнетизмъ.

---

19. Магнитная масса[1]).

Стальной брусокъ, обладающій свойствомъ притягивать желѣзо, называютъ магнитомъ. Свойство это впервые было замѣчено у руды, найденной у города Магнезіи, откуда сталь, обладающую этой способностью, называютъ магнитною. Если погрузить стержень изъ намагниченной стали въ желѣзныя опилки, то онѣ болѣе всего пристаютъ къ концамъ стержня



Фиг. 27.

(фиг. 27). Тѣ части магнита, гдѣ обнаруживается наибольшая сила притяженія, называются полюсами магнита. При длинныхъ и тонкихъ магнитахъ можно приблизительно принять, что магнитная сила притяженія исходитъ изъ одной точки, и, слѣдовательно, можно допустить, что полюсы находятся приблизительно въ мѣстахъ, обозначенныхъ на фиг. 27 буквами N и S. Полюсы эти не располагаются на самыхъ концахъ магнита, но

---

[1]) См. о магнитѣ и электромагнетизмѣ: Kittler, Handbuch der Elektrotechnik. 2 Aufl. 1892.

находятся очень близко отъ этихъ послѣднихъ. Линія, проходящая черезъ полюсы, называется магнитною осью.

Магнитъ, свободно вращающійся вокругъ оси A, устанавливается такимъ образомъ, что одинъ изъ его полюсовъ обращается къ географическому сѣверу. Этотъ полюсъ называется сѣвернымъ полюсомъ магнита, противоположный же ему—южнымъ. Если станемъ приближать два магнита другъ къ другу, то замѣтимъ, что одноименные полюсы взаимно отталкиваются, разноименные же взаимно притягиваются. Отсюда слѣдуетъ, что на географическомъ сѣверномъ полюсѣ находится магнитный южный полюсъ, а на географическомъ южномъ—магнитный сѣверный.

Сила, съ которой два полюса взаимно дѣйствуютъ другъ на друга, была впервые измѣрена Кулономъ. Онъ подвѣшивалъ длинный тонкій магнитъ на металлической нити такимъ образомъ, что магнитная ось послѣдняго находилась въ горизонтальномъ положеніи. Закручивая подвѣсную нить, онъ удалялъ сѣверный полюсъ этого подвѣшеннаго магнита отъ южнаго полюса другого магнита, вертикально установленнаго. Такъ какъ сила, развиваемая въ закрученной нити, пропорціональна углу крученія, то Кулонъ могъ установить соотношенія между удаленіемъ полюсовъ другъ отъ друга и силою, съ которою они притягиваются. Оказалось, что эта сила обратно пропорціональна квадрату разстоянія между взаимодѣйствующими полюсами. Кромѣ того, названная сила становится вдвое больше, когда путемъ присоединенія другого такого же магнита удваивается количество магнетизма или магнитная масса.

Обозначимъ черезъ:

f силу взаимодѣйствія двухъ полюсовъ,
m_1 магнитную массу одного полюса,
m_2 магнитную массу другого полюса,
r разстояніе между взаимодѣйствующими полюсами въ сант.,

тогда будемъ имѣть:

$$f = \frac{m_1 \cdot m_2}{r_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22)$$

Если выберемъ единицы для длины и силы, то тѣмъ уже установимъ единицу для магнитной массы m.

За единицу длины примемъ сантиметръ, за единицу силы—силу, которая сообщаетъ массѣ 1 см^3 воды единицу ускоренія, т. е. которая въ каждую секунду производитъ увеличеніе скорости на 1 см въ секунду. Эту силу называютъ диною. Такъ какъ вѣсъ одного килограмма представляетъ силу, сообщающую ему, т. е. 1 000 см^3 воды, ускореніе въ 981 см, то вѣсъ одного килограмма равенъ 981 000 динъ.

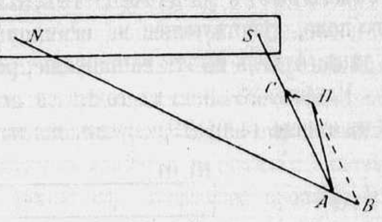
Отсюда слѣдуетъ:

$$1 \text{ дина} = \frac{1}{981\,000} \text{ клг}^* = 1{,}02 \text{ млг}^*\ ^{1)}.$$

Если мы желаемъ, чтобы законъ Кулона сохранилъ свой простѣйшій видъ, представленный равенствомъ (22), то уже не имѣемъ права произвольно выбирать единицу для магнитной массы,—она получается изъ выбранныхъ единицъ. Если, положимъ, въ формулѣ (22) $m_1 = 1$, $m_2 = 1$ и $r = 1$, то и $f = 1$. Слѣдовательно, за единицу магнитной массы принимается такая магнитная масса, которая дѣйствуетъ на другую, равную ей и удаленную отъ нея на 1 см, съ силой въ одну дину. Въ виду этого мы будемъ массу полюса или количество магнетизма измѣрять тою силою, которая проявляется при вполнѣ опредѣленныхъ условіяхъ, и опредѣлимъ массу m даннаго полюса, какъ силу, съ которою послѣдній дѣйствуетъ на массу при разстояніи между ними въ 1 см.

20. Напряженіе магнитнаго поля.

Магнитнымъ полемъ называютъ пространство, гдѣ ощущается дѣйствіе магнитныхъ силъ, обнаруживаемое, напримѣръ, отклоненіемъ магнитной стрѣлки. Подобнаго рода дѣйствіе является вообще результатомъ дѣйствія обоихъ полюсовъ магнита. Вообразимъ, напримѣръ, въ точкѣ A (фиг. 28), вблизи магнита, свободно перемѣщающійся сѣверный полюсъ другого магнита, соотвѣтствующій южный полюсъ котораго удаленъ настолько значительно, что его дѣйствіемъ можно пренебречь. Тогда сѣверный полюсъ, находящійся въ точкѣ A, отталкивается сѣвернымъ полюсомъ N по направленію AB и притягивается южнымъ полюсомъ S по направленію AC. Эти силы будутъ обратно пропорціональны квадрату разстояній. Если на фиг. 28 разстоянія отъ A до обоихъ полюсовъ относятся между собою, напримѣръ, какъ $2:1$, то соотвѣтствующія силы будутъ въ отношеніи $1:4$.



Фиг. 28.

---

[1]) Въ тѣхъ случаяхъ, когда подразумѣваются не массы, а вѣса, т. е. силы, мы будемъ обозначенія массъ снабжать звѣздочкой.

Обѣ эти силы, складываясь по діагонали параллелограмма, дадутъ равнодѣйствующую AD, которая опредѣляетъ направленіе магнитной силы въ данной точкѣ. Если помѣстить въ магнитное поле небольшую свободно вращающуюся магнитную стрѣлку, то магнитная сила, развиваемая даннымъ магнитомъ, станетъ дѣйствовать на концы стрѣлки и будетъ вращать ее до тѣхъ поръ, пока магнитная ось этой стрѣлки не совпадаетъ съ направленіемъ силы. Въ этомъ положеніи стрѣлка придетъ въ равновѣсіе. Слѣдовательно, ось свободно вращающейся магнитной стрѣлки дастъ намъ направленіе магнитной силы въ каждомъ мѣстѣ магнитнаго поля.

Чтобы измѣрить напряженіе магнитнаго поля, помѣстимъ данный полюсъ m въ опредѣленной точкѣ и опредѣлимъ силу, съ которою онъ отталкивается или притягивается. Эта сила, съ одной стороны, пропорціональна магнитной массѣ m, на которую дѣйствуетъ магнитное поле, а съ другой стороны пропорціональна напряженію магнитнаго поля. Если обозначимъ напряженіе магнитнаго поля черезъ H, то получаемъ:

$$f = m \cdot H \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (23)$$

Предположимъ въ этомъ равенствѣ $m = 1$, получаемъ $H = f$. Такимъ образомъ, **напряженіе магнитнаго поля въ данной точкѣ равняется выраженной въ динахъ силѣ, которую единица магнитной массы испытываетъ въ этой точкѣ.** На основаніи сказаннаго выше, магнитное поле, дѣйствующее на единицу магнитной массы съ силою, равною 1 динѣ, будетъ имѣть напряженіе, равное единицѣ.

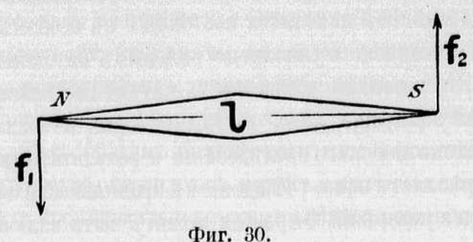
На фиг. 28 сила въ точкѣ A исходила изъ обоихъ полюсовъ. Разберемъ теперь (фиг. 29) случай, когда одинъ изъ полюсовъ магнита значительно удаленъ. Тогда при опредѣленіи напряженія поля мы можемъ пренебречь дѣйствіемъ этого полюса, въ виду того, что послѣднее обратно пропорціонально квадрату разстоянія. Для опредѣленія въ этомъ случаѣ напряженія поля въ любой точкѣ A пространства, окружающаго магнитъ, помѣстимъ въ точку A полюсъ, масса котораго равна 1. Если масса полюса магнита равняется m, а разстояніе точки A отъ полюса равно r, то, по закону Кулона, для силы взаимодѣйствія получаемъ:

Фиг. 29.

$$H = \frac{m \cdot 1}{r^2} = \frac{m}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (24)$$

Въ этомъ равенствѣ силу взаимодѣйствія мы обозначили прямо черезъ H, вмѣсто f, потому, что здѣсь имѣемъ дѣло съ силою, дѣйствующей на полюсъ 1, т. е. съ напряженіемъ поля.

Помѣстимъ, теперь, магнитную стрѣлку въ однородное магнитное поле напряженія H. Пусть магнитная масса одного полюса будетъ m, а длина магнитной оси l (фиг. 30). При этомъ ось стрѣлки пусть расположена



Фиг. 30.

перпендикулярно къ направленію магнитной силы, которая предполагается на чертежѣ идущей сверху внизъ. Тогда на сѣверный полюсъ дѣйствуетъ сила $f_1 = m \cdot H$, приложенная къ плечу $\frac{l}{2}$, равнымъ образомъ на южный полюсъ S дѣйствуетъ сила $f_2 = m \cdot H$, и ея плечо $\frac{l}{2}$. Тогда полный вращающій моментъ будетъ:

$$\frac{l}{2}(f_1 + f_2) = 2\,m \cdot H \cdot \frac{l}{2} = H \cdot m \cdot l.$$

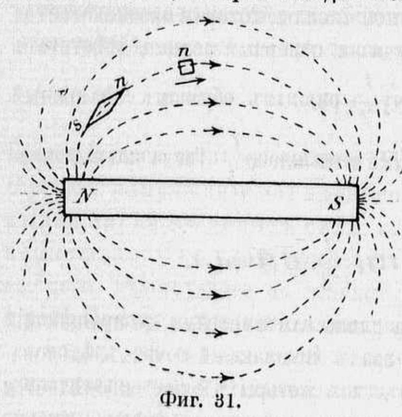
Такъ какъ сила измѣряется динами, а длина сантиметрами, то вращающій моментъ мы получимъ въ диносантиметрахъ. Вращающій моментъ, слѣдовательно, состоитъ изъ двухъ величинъ изъ которыхъ одна опредѣляется внѣшнимъ полемъ H, а другая магнитнымъ свойствомъ стрѣлки, именно произведеніемъ магнитной массы на длину оси. Послѣднее произведеніе $m \cdot l$ называютъ **магнитнымъ моментомъ** стрѣлки.

21. Теорія силовыхъ линій.

До сихъ поръ мы основывались на старомъ воззрѣніи, по которому въ полюсѣ, принимаемомъ за точку, сосредоточено извѣстное количество магнетизма, проявляющее «дѣйствіе на разстояніе». Но въ дѣйствительности никогда не приходится имѣть дѣло съ полюсомъ въ видѣ точки, равнымъ образомъ, новѣйшей физикой не признается и «дѣйствіе на разстояніе». Это старое воззрѣніе имѣетъ однако за собою извѣстное значеніе, такъ какъ оно весьма просто и въ математической формѣ выражаетъ магнитныя

явленія, добытыя опытнымъ путемъ. Но къ болѣе глубокому пониманію и наглядному представленію магнитныхъ явленій мы можемъ придти только при помощи геніальной теоріи силовыхъ линій Фарадея. Фарадей не признаетъ никакихъ «дѣйствій на разстояніе», и по его воззрѣнію силовое воздѣйствіе вовсе не возникаетъ только въ тотъ моментъ, когда въ это пространство вводится другой магнитъ. Пространство, окружающее магнитъ, по его мнѣнію, находится постоянно въ особомъ состояніи. Оно какъ бы само намагничено и заполнено силовымъ потокомъ, исходящимъ изъ полюсовъ. Это воззрѣніе разъясняетъ магнитныя явленія такъ же хорошо, если даже не лучше, какъ и старая теорія, и согласованіе между результатами математическаго изслѣдованія и результатами предположеній Фарадея подкрѣпляетъ наше убѣжденіе въ правильности обѣихъ гипотезъ.

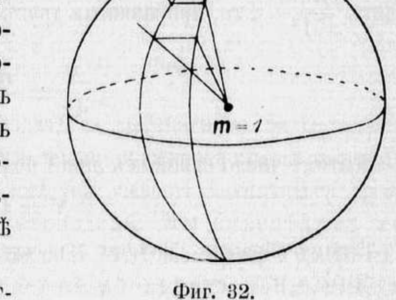
Основная идея воззрѣній Фарадея можетъ быть иллюстрирована простымъ опытомъ, который каждый можетъ продѣлать. Сквозь сѣтку на картонъ, помѣщаемый надъ магнитомъ и приводимый въ легкое сотрясеніе, насыпаютъ желѣзныя опилки, которыя располагаются на послѣднемъ по характернымъ кривымъ (фиг. 31). Намагничиваясь во время паденія, желѣзныя опилки располагаются какъ магнитныя стрѣлки, такъ что ихъ продольныя оси совпадаютъ съ направленіемъ магнитной силы. Частицы желѣза притягиваютъ одна другую и образуютъ, такимъ образомъ, кривыя, обозначающія направленіе магнитной силы съ большей наглядностью, чѣмъ это было при геометрическомъ построеніи на фиг. 28. Подобнаго рода кривыя называютъ линіями силъ, и при этомъ условно принимаютъ, что онѣ выходятъ изъ сѣвернаго полюса и входятъ въ южный. Магнитная стрѣлка подъ дѣйствіемъ ихъ устанавливается такимъ образомъ, что ея ось является касательной къ линіи силъ, и сѣверный полюсъ стрѣлки указываетъ на положительное направленіе этой линіи. Свободно перемѣщающійся полюсъ n магнита, соотвѣтствующій южный полюсъ котораго значительно удаленъ, перемѣщается вдоль линіи силъ отъ N къ S (фиг. 31). Такимъ образомъ линія силъ опредѣляется, какъ путь свободно перемѣщающагося сѣвернаго полюса, и въ сущности представляетъ собою не что иное, какъ



Фиг. 31.

направленіе магнитной силы. Но въ концѣ концовъ привыкаютъ и, можетъ быть, не безъ основанія, смотрѣть на линіи силъ, какъ на нѣчто существующее въ дѣйствительности и схожее съ видимыми линіями, образуемыми желѣзными опилками.

Далѣе, линія силъ не является только очень удобнымъ изображеніемъ направленія магнитной силы, но при помощи ея можно выразить величину силы, т. е. напряженіе магнитнаго поля, и въ этомъ случаѣ мы будемъ ее называть силовою линіею. Замѣтимъ, что силовой потокъ, исходящій изъ какого-либо полюса, не распредѣляется только по плоскости, но распространяется въ видѣ лучей по всему пространству. Если мы вообразимъ полюсъ центромъ ряда концентрическихъ шаровыхъ поверхностей, то силовой потокъ, проникая изнутри наружу, будетъ пересѣкать послѣдовательно эти шаровыя поверхности (фиг. 32). Такъ какъ послѣднія относятся между собою, какъ квадраты ихъ радіусовъ, то силовой потокъ на квадратный сантиметръ сферической поверхности будетъ обратно пропорціоналенъ квадрату радіуса r. Такъ какъ кромѣ того потокъ увеличивается съ усиленіемъ поля m, то онъ пропорціоналенъ выраженію m/r^2, т. е. напряженію поля въ данномъ мѣстѣ сферической поверхности.



Фиг. 32.

Если выберемъ, теперь, соотвѣтствующую единицу для силовой линіи, то коэффиціентъ пропорціональности получимъ равнымъ единицѣ.

За единицу силовой линіи мы выберемъ силовой потокъ, приходящійся на 1 кв. сант., когда на полюсъ 1 будетъ дѣйствовать сила въ 1 дину. Тогда число силовыхъ линій на 1 кв. сант. будетъ не только пропорціонально напряженію поля H, но и численно равно этому послѣднему.

Слѣдовательно, напряженіе поля опредѣляется по своей численной величинѣ не только силою, дѣйствующей на полюсъ 1, но и числомъ силовыхъ линій, приходящихся на 1 кв. сант. Положимъ, что напряженіе поля въ междужелѣзномъ пространствѣ (между полюсами и якоремъ) динамомашины составляетъ 7 000. Это значитъ, что изъ каждаго квадратнаго сантиметра поверхности сѣвернаго полюса исходитъ 7 000 силовыхъ линій. Если же обращенная къ якорю поверхность полюса имѣетъ 400 см^2,

то все число исходящихъ изъ сѣвернаго полюса силовыхъ линій будетъ:

$$N = 7\,000 \cdot 400 = 2{,}8 \cdot 10^6 \text{ силовыхъ линій.}$$

Вообще силовой потокъ, исходящій изъ какой-либо поверхности, равенъ произведенію плотности силового потока H на площадь Q, которую силовой потокъ пересѣкаетъ подъ прямымъ угломъ, т. е.

$$N = H \cdot Q \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (25)$$

Отсюда мы получаемъ дальнѣйшее простое опредѣленіе единицы силовой линіи. Положимъ, что силовой потокъ N, исходящій изъ полюса m, расположеннаго въ центрѣ сферической поверхности радіуса 1, проходитъ сквозь боковую поверхность этой среды, равную 4π кв. сант. Тогда число силовыхъ линій на 1 кв. сант. будетъ $\frac{N}{4\pi}$. Такъ какъ, согласно закону Кулона, напряженіе силового поля на данной боковой поверхности будетъ $\frac{m \cdot 1}{1^2}$, то, приравнивая другъ другу эти выраженія, получаемъ:

$$\frac{N}{4\pi} = \frac{m \cdot 1}{1^2}.$$

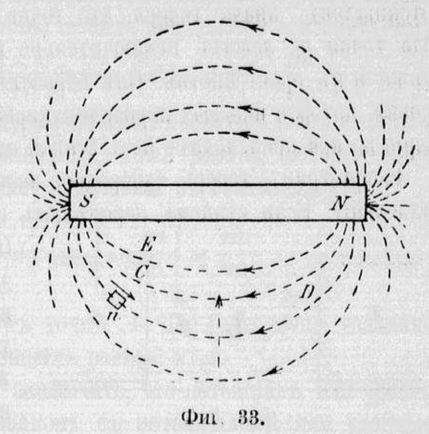
Поэтому число силовыхъ линій полюса m будетъ:

$$N = 4\pi m \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (26)$$

Такимъ образомъ, полюсъ 1 посылаетъ 4π силовыхъ линій, или силовая линія представляетъ 4π-ую часть силового потока, исходящаго изъ полюса 1.

22. Магнитный потенціалъ.

Какъ мы уже видѣли, свободно перемѣщающійся сѣверный полюсъ будетъ двигаться въ магнитномъ полѣ вдоль силовыхъ линій. Если составимъ для каждой точки произведеніе изъ дѣйствующей на полюсъ силы на путь, на протяженіи котораго послѣдняя дѣйствуетъ, и просуммируемъ всѣ эти произведенія, то получимъ работу, произведенную магнитнымъ полемъ при этомъ перемѣщеніи. Эта работа пойдетъ или на преодолѣніе механическаго сопротивленія, при чемъ она, слѣдовательно, выразится въ видѣ механической работы, или же превратится въ живую силу. Если же, наоборотъ, мы станемъ перемѣщать сѣверный полюсъ n (фиг. 33) противъ направленія силовыхъ линій отъ S къ N, то намъ придется преодолѣвать противодѣйствующія силы магнитнаго поля, при чемъ этотъ сѣверный полюсъ будетъ одновременно притягиваться къ S и отталкиваться отъ N. Слѣдовательно, мы должны затратить работу, которая получается суммированіемъ отдѣльныхъ произведеній изъ силы на пройденную длину, вдоль всего пути. Эта работа, затраченная и накопляемая въ видѣ потенціальной энергіи снова освободится, когда сѣверный полюсъ будетъ предоставленъ дѣйствію поля. При этомъ либо снова будетъ произведена механическая работа, либо полюсу n, который мы предполагаемъ находящимся въ желѣзной массѣ, будетъ сообщена нѣкоторая живая сила. Слѣдовательно, происходящія здѣсь явленія совершенно сходны съ явленіями при поднятіи груза и преодолѣніи при этомъ противодѣйствующей силы тяжести. Произведенная и накопленная въ видѣ потенціальной энергіи работа освободится снова, когда грузъ будетъ падать съ высокаго на болѣе низкій уровень. Аналогично этимъ уровнямъ можно предположить, что между различными точками силовой линіи имѣется разность магнитныхъ уровней или разность магнитнаго потенціала. Мы опредѣлимъ ее такъ же, какъ въ ст. 11, т. е. какъ работу, которую нужно затратить для того, чтобы положительную единицу количества магнетизма, т. е. полюсъ, равный 1, перемѣстить съ низкаго уровня до болѣе высокаго. И наоборотъ, она можетъ быть также опредѣлена, какъ работа, которая производится силами поля, когда полюсъ, равный 1, перемѣщается съ высокаго на болѣе низкій уровень. Если примемъ уровень сѣвернаго полюса за положительный, то уровень южнаго должны принять за отрицательный, уровень же въ серединѣ силовой линіи считать за нулевой, а потенціалъ на этомъ уровнѣ равнымъ нулю.



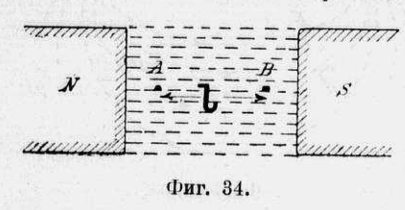
Фиг. 33.

При перемѣщеніи сѣвернаго полюса n отъ C до D (фиг. 33) для работы безразлично, какъ будетъ происходить такое передвиженіе—по прямому пути, т. е. вдоль силовой линіи, или по какой угодно иной траекторіи. Это слѣдуетъ изъ закона сохраненія энергіи. Работа, которую затрачиваютъ на перемѣщеніе сѣвернаго полюса n отъ C до D, независимо отъ пути, остается постоянною, такъ какъ она сохраняется въ видѣ потенціальной энергіи, и размѣры ея опредѣляются только начальнымъ и конеч-

нымъ положеніями. Она возвращается полностью всякій разъ, когда полюсъ n, подъ вліяніемъ силъ магнитнаго поля, снова перемѣстится отъ D къ C.

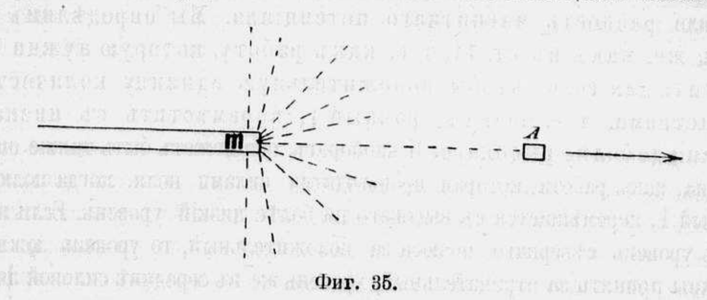
На перемѣщеніе полюса n изъ C въ E не придется совершенно затрачивать работы, такъ какъ движеніе происходитъ перпендикулярно къ направленію силъ. Между точками C и E не существуетъ никакой разности потенціаловъ, иначе говоря, это точки равнаго потенціала. Подобнаго рода точки не лежатъ исключительно въ плоскости, но располагаются также и въ пространствѣ. Онѣ образуютъ такъ называемую поверхность уровня, которая повсюду перпендикулярна къ направленію силъ, и перемѣщеніе по ней происходитъ безъ всякой затраты работы.

Разсмотримъ, теперь, однородное поле, силовыя линіи котораго всѣ параллельны. Если станемъ перемѣщать полюсъ противъ силовыхъ линій (фиг. 34), то сила, которая будетъ дѣйствовать на полюсъ, равный 1, вдоль всего пути l будетъ одна и та же. Разность потенціаловъ между точками A и B, находящимися на разстояніи l, опредѣлится тогда произведеніемъ силы, дѣйствующей на полюсъ, равный 1, на путь, т. е. равна $H \cdot l$.



Фиг. 34.

До сихъ поръ мы все время говорили о разности потенціаловъ, теперь же перейдемъ къ опредѣленію самаго магнитнаго потенціала. Положимъ,



Фиг. 35.

имѣется сосредоточенный въ точкѣ сѣверный полюсъ m, южный полюсъ котораго удаленъ на безконечное разстояніе (фиг. 35). Силовыя линіи въ этомъ случаѣ въ видѣ лучей расходятся въ пространство и подъ вліяніемъ ихъ единичный сѣверный полюсъ, помѣщенный въ точку A, будетъ отталкиваться по направленію стрѣлки на безконечное разстояніе. Сила, дѣйствующая на него, уменьшается на протяженіи всего пути въ отношеніи квадрата разстоянія и въ концѣ становится равною нулю. Вся работа,

которая при этомъ освободилась бы, когда единичный полюсъ изъ точки A перемѣстился бы на безконечное разстояніе, явилась бы разностью потенціаловъ между точкой A и безконечено удаленною точкою. Эту разность называютъ потенціаломъ точки A или потенціаломъ полюса m въ точкѣ A.

Если въ какой либо моментъ движенія разстояніе между подвижнымъ полюсомъ 1 и полюсомъ m будетъ x, то сила притяженія составитъ тогда $\frac{m \cdot 1}{x^2}$ динъ, а работа вдоль пути dx будетъ равна $dA = \frac{m \cdot 1}{x^2} \cdot dx$.

Если r будетъ разстояніе между подвижнымъ полюсомъ 1 и полюсомъ m въ началѣ движенія, т. е. въ точкѣ A, то вся работа, которая будетъ совершена, когда полюсъ 1 будетъ удаленъ въ безконечность:

$$A = \int_r^\infty \frac{m}{x^2} \cdot dx = \left[-\frac{m}{x}\right]_r^\infty = \frac{m}{r}.$$

Это стало быть потенціалъ въ точкѣ A. Для безконечно удаленной точки мы получаемъ отсюда потенціалъ равный нулю.

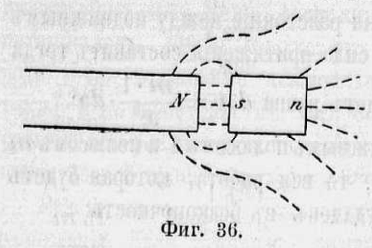
Изъ сказаннаго выше можно заключить, что потенціалъ или уровень безконечно удаленной точки одинаковъ съ потенціаломъ или уровнемъ средней точки силовой линіи, для которой, какъ мы видѣли выше, потенціалъ оказался также равнымъ нулю. И дѣйствительно, перемѣщеніе сѣвернаго полюса по направленію пунктирной стрѣлки на фиг. 33 изъ безконечности на середину какой-нибудь силовой линіи могло бы быть совершено безъ всякой затраты работы, ибо полюсъ при этомъ притягивался бы южнымъ полюсомъ магнита и отталкивался бы съ такою же силою сѣвернымъ, или, другими словами, движеніе происходило бы все время по направленію, нормальному къ силовымъ линіямъ.

Если вообще понятіе «потенціалъ» представляетъ для начинающаго какія-либо затрудненія, то онъ съ успѣхомъ можетъ замѣнить его представленіемъ объ уровняхъ, такъ какъ на практикѣ всегда приходится имѣть дѣло съ разностью потенціаловъ и уровней, а не съ самими потенціалами.

23. Желѣзо въ магнитномъ полѣ.

Помѣстивъ кусокъ желѣза возлѣ магнита и насыпавъ на послѣдній опилки, мы увидимъ, что желѣзо, находясь въ магнитномъ полѣ, какъ бы втягиваетъ въ себя силовыя линіи (фиг. 36). Вслѣдствіе этого у конца куска желѣза, обращеннаго къ магнитному полюсу, возникаетъ большое число силовыхъ линій, въ то время какъ магнитное поле въ остальной части ослабляется. Раньше этотъ фактъ объясняли, какъ явленіе магнитной индукціи. Согласно этому воззрѣнію, въ желѣзѣ должны «индуктироваться»

полюсы, при чемъ знакъ индуктированнаго полюса будетъ обратный знаку противолежащаго—индуктирующаго. Такъ какъ полюсы разныхъ знаковъ взаимно притягиваются, то этимъ можно объяснить уже раньше упомянутое явленіепритяженія желѣза магнитомъ.



Фиг. 36.

Къ тѣмъ же результатамъ приводитъ и теорія силовыхъ линій. По этой теоріи, желѣзу приписываютъ особое свойство проницаемости силовыми линіями, въ силу котораго эти послѣднія съ большей легкостью пронизываютъ желѣзо. Притяженіе желѣза полюсомъ приводитъ насъ къ заключенію, что силовыя линіи не совершаютъ напрасно длиннаго пути, когда онѣ могутъ направляться по болѣе короткому, и что онѣ, такимъ образомъ, имѣютъ стремленіе сокращаться, какъ натянутая и замкнутая резиновая нить. Но кромѣ этого мы должны приписать имъ еще нѣкоторое противодѣйствіе къ скучиванію, такъ какъ въ противномъ случаѣ онѣ всѣ старались бы расположиться около магнита по кратчайшему пути отъ сѣвернаго полюса N къ южному S. Но онѣ отталкиваютъ взаимно другъ друга по направленію, нормальному къ собственному направленію, подобно двумъ параллельнымъ магнитамъ, имѣющимъ свои сѣверные полюсы на одной сторонѣ, а южные на другой.

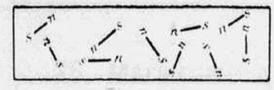
Если же силовыя линіи предпочитаютъ проходить сквозь желѣзо, такъ какъ оно лучше проводитъ ихъ, чѣмъ воздухъ, то тогда становится понятнымъ, почему на фиг. 36 силовыя линіи полюса N входятъ въ большемъ числѣ въ противолежащій конецъ желѣза [1]). Послѣдній вслѣдствіе этого уподобляется нами южному полюсу, ибо, по раньше установленному положенію, силовыя линіи должны входить въ южный полюсъ. Противоположный конецъ желѣза является тогда сѣвернымъ полюсомъ, такъ какъ силовыя линіи изъ него выходятъ. Намагничиваніе желѣза происходитъ тѣмъ сильнѣе, чѣмъ лучше послѣднее проводитъ силовыя линіи. Напримѣръ, у ковкаго желѣза или мягкой стали оно, при прочихъ равныхъ условіяхъ, сильнѣе, чѣмъ у закаленнаго чугуна или закаленной стали.

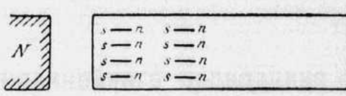
Этотъ фактъ заставляетъ предполагать, что намагничиваніе происходитъ подобнымъ же образомъ, какъ и разсмотрѣнное нами раньше размѣ-

[1]) При переходѣ силовыхъ линій изъ одной среды въ другую, тангенсы угловъ входа относятся, какъ проницаемости этихъ послѣднихъ. Вслѣдствіе большой проницаемости желѣза силовыя линіи входятъ изъ воздуха въ желѣзо почти перпендикулярно.

щеніе желѣзныхъ опилокъ. Полагаютъ, что безконечно малыя частицы, такъ называемыя молекулы, желѣза или стали являются уже природными магнитами: онѣ расположены только въ безпорядкѣ (фиг. 37a), вслѣдствіе чего не могутъ произвести никакого внѣшняго дѣйствія, и желѣзо кажется, поэтому, ненамагниченнымъ. При приближеніи магнита (фиг. 37b) молекулы располагаются по одному направленію и обнаруживаютъ, такимъ образомъ, на конечныхъ поверхностяхъ «свободный» магнетизмъ, въ то время, какъ ближе къ серединѣ дѣйствія ихъ взаимно уравновѣшиваются. Не трудно, конечно, понять, что въ мягкомъ желѣзѣ молекулы могутъ легче измѣнять свое положеніе, чѣмъ въ твердой стали.

Подтвержденіемъ этой теоріи молекулярныхъ магнитовъ Вебера можетъ служить тотъ фактъ, что мягкое желѣзо намагничивается только на короткое время, тогда какъ сталь, наоборотъ, остается намагниченной надолго. Въ мягкомъ желѣзѣ молекулы послѣ удаленія индуктирующаго полюса почти совершенно приходятъ снова въ свое первоначальное положеніе, такъ что остается только незначительный остаточный магнетизмъ.


Фиг. 37a.



Фиг. 37b.

Наоборотъ, молекулы твердой стали сохраняютъ болѣе устойчиво разъ приданное имъ положеніе, и благодаря этому сталь остается намагниченной на болѣе продолжительное время. На основаніи молекулярной теоріи намагничиванія легко понять, почему стальной магнитъ посрединѣ оси ненамагниченъ, и почему на поверхностяхъ излома раздѣленнаго на двѣ части магнитнаго стержня обнаруживаются полюсы противоположныхъ знаковъ.

Лучшимъ подтвержденіемъ теоріи Вебера является, однако, наблюдаемое нагрѣваніе при перемѣнномъ намагничиваніи желѣза. Такое намагничиваніе сопряжено съ вращеніемъ молекулъ, а послѣднее не можетъ происходить безъ тренія, такъ какъ молекулы желѣза стремятся остаться въ прежнемъ положеніи и сопротивляются его измѣненію. Это явленіе называютъ, поэтому, магнитнымъ треніемъ или гистерезисомъ, отъ греческаго слова, означающаго «запаздывать». Затраченная на намагничиваніе и размагничиваніе работа переходитъ въ теплоту, при чемъ потеря работы въ секунду пропорціональна числу перемѣнъ полюсовъ въ секунду и объему желѣза. Кромѣ того расходъ работы зависитъ также отъ степени намагничиванія и отъ твердости желѣза.

24. Земной магнетизмъ.

Такъ какъ положеніе магнитнаго полюса земли не совпадаетъ съ положеніемъ географическаго полюса, то магнитная ось стрѣлки образуетъ съ географическимъ меридіаномъ уголъ, который называютъ угломъ склоненія. Склоненіе въ Германіи западное и для Берлина въ настоящее время составляетъ 9°40′. Съ другой стороны, сѣверный конецъ свободно подвѣшенной магнитной стрѣлки образуетъ съ горизонталью уголъ, который называютъ угломъ наклоненія. Наклоненіе для Берлина въ настоящее время составляетъ 66°. При обыкновенныхъ магнитахъ, вращающихся вокругъ вертикальной оси, свое дѣйствіе проявляетъ только часть магнитной силы, такъ называемая горизонтально составляющая. Ея размѣры для Берлина въ настоящее время 0,19; это означаетъ, что на единичный полюсъ въ горизонтальномъ направленіи дѣйствуетъ сила, равная 0,19 динамъ [1]).

---

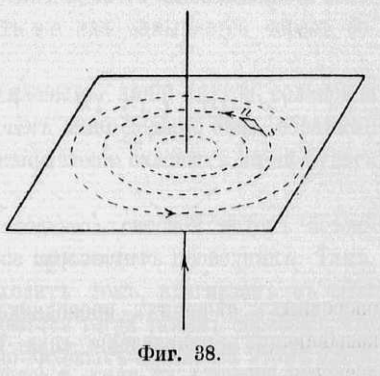
[1]) Для Павловска (Константиновская обсерваторія вблизи Петербурга) склоненіе восточное и составляетъ 1°9′, наклоненіе 70°32′, горизонтально составляющая 0,17. *Ред.*

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

25. Магнитное дѣйствіе прямолинейнаго проводника съ токомъ.—26. Электродвижущая сила индукціи. — 27. Превращеніе механической работы въ электрическую. — 28. Превращеніе электрической работы въ механическую. —29. Напряженіе поля внутри витка съ токомъ и внутри катушки.—30. Кривыя намагничиванія.—31. Магнитное сопротивленіе.—32. Самоиндукція.—33. Законы взаимной индукціи.—34. Гистерезисъ.—35. Мощность электромагнита.—36. Токи Фуко.

25. Магнитное дѣйствіе прямолинейнаго проводника съ токомъ.

Опытъ показываетъ, что магнитная стрѣлка вблизи проводника съ токомъ отклоняется отъ своего обычнаго положенія. Слѣдовательно, электрическій токъ образуетъ въ окружающемъ его пространствѣ магнитное поле. Направленіе силовыхъ линій этого поля можно опредѣлить, перемѣщая небольшую магнитную стрѣлку вдоль по направленію ея оси или насыпая на нормальную къ проводнику плоскость желѣзныя опилки (фиг. 38).



Фиг. 38.

Послѣднія располагаются при этомъ по концентрическимъ кругамъ, центры которыхъ находятся на проводникѣ. Силовыя линіи, порождаемыя токомъ, являются замкнутыми кривыми, и сѣверный полюсъ свободно подвѣшеннаго магнита, южный полюсъ котораго значительно удаленъ, станетъ перемѣщаться вокругъ проводника вдоль силовыхъ линій. Это пере-

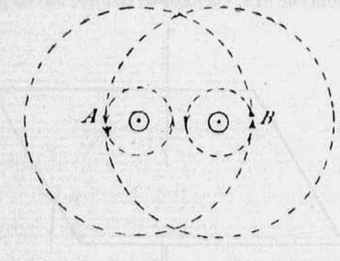
мѣщеніе всегда перпендикулярно къ плоскости, проведенной черезъ проводникъ и полюсъ, и направленіе его опредѣляется по правилу Ампера. Если вообразить наблюдателя, плывущаго по направленію тока и смотрящаго на магнитную стрѣлку, то сѣверный полюсъ отклонится влѣво отъ наблюдателя.

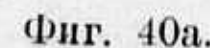
Отсюда слѣдуетъ, что всѣ силовыя линіи, порождаемыя замкнутымъ контуромъ съ токомъ, входятъ въ плоскость контура съ одной его стороны и выходятъ съ другой, чтобы затѣмъ внѣ ея замкнуться (фиг. 39).

Фиг. 39.

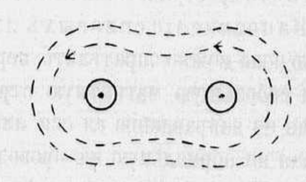
Такимъ образомъ, контуръ съ токомъ представляетъ собою магнитный дискъ, южный полюсъ котораго лежитъ по ту сторону, гдѣ силовыя линіи входятъ въ плоскость контура, а сѣверный полюсъ—гдѣ силовыя линіи выходятъ изъ плоскости этого контура. Очень удобнымъ въ этомъ случаѣ является слѣдующее правило: слѣдуетъ смотрѣть на плоскость контура, и если направленіе тока въ контурѣ будетъ по часовой стрѣлкѣ, то передъ нами южный полюсъ, если же направленіе тока противъ часовой стрѣлки, то передъ нами сѣверный полюсъ.

Для выясненія распредѣленія магнитнаго потока у катушки съ токомъ разсмотримъ сначала два параллельныхъ проводника, которые пересѣкаютъ перпендикулярно плоскость чертежа и по которымъ идутъ токи одного направленія (фиг. 40a и 40b). Точки, поставленныя на





Фиг. 40a.

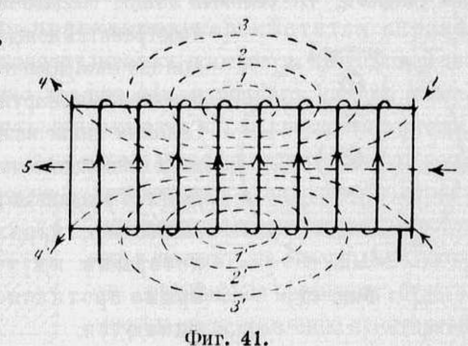


Фиг. 40b.

поперечныхъ сѣченіяхъ проводниковъ, представляютъ острія стрѣлокъ, указывающихъ направленіе тока. Такимъ образомъ, токъ течетъ изъ-за плоскости чертежа къ намъ и создаетъ силовыя линіи направленія противъ часовой стрѣлки. Какъ видно изъ фиг. 40a, силовыя линіи, создаваемыя обоими проводниками, въ пространствѣ между этими послѣдними взаимно уравновѣшиваются или нейтрализуются, въ то время какъ во внѣш-

немъ пространствѣ, какъ напримѣръ у точекъ A и B, онѣ складываются. Густота этихъ послѣднихъ въ этомъ мѣстѣ будетъ больше, чѣмъ около каждаго проводника въ отдѣльности. Отсюда мы видимъ, что общій силовой потокъ, создаваемый обоими токами (фиг. 40b), окружаетъ оба проводника; это подтверждается и опытомъ съ опилками.

Если мы теперь совьемъ проволоку въ видѣ спирали и создадимъ такимъ образомъ катушку, то силовыя линіи будутъ пересѣкать, какъ на фиг. 39, плоскости отдѣльныхъ витковъ. Здѣсь онѣ сливаются въ длинныя силовыя линіи, пронизывающія всю или почти всю катушку, при чемъ внутри ея идутъ большей своею частью параллельно оси и замыкаются снаружи вокругъ. Силовыя линіи 1 1′ (на фиг. 41) создаются въ этомъ случаѣ средними витками, силовыя линіи 2 и 2′ четырмя средними, силовыя линіи 3 и 3′ шестью средними, тогда какъ силовыя линіи 4, 4′ и 5, выходящія изъ лобовыхъ поверхностей катушки, получаются отъ общаго дѣйствія всѣхъ витковъ.



Фиг. 41.

Подобнаго рода катушку, черезъ которую проходитъ токъ, называютъ соленоидомъ. Въ нѣкоторомъ отношеніи послѣдній схожъ съ магнитомъ: у него, подобно магнитамъ, большая часть силовыхъ линій исходитъ изъ торцевыхъ поверхностей, часть же ихъ замыкается черезъ боковыя поверхности.

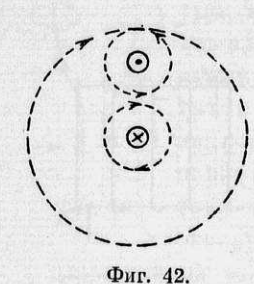
Положительное направленіе силовыхъ линій внутри соленоида опредѣляется по правилу Ампера, при чемъ лицо должно быть обращено во внутрь соленоида. Такъ на фиг. 41 направленіе силовыхъ линій будетъ справа налѣво.

Свойствомъ проводника съ токомъ создавать силовой потокъ объясняется то механическое дѣйствіе, которое производитъ проводникъ. Такъ, напримѣръ, катушка, по которой проходитъ токъ, втягиваетъ въ себя желѣзный стержень. Желѣзо устанавливается тогда такимъ образомъ, что черезъ него проходитъ наибольшее число силовыхъ линій. На этомъ принципѣ основана конструкція обычныхъ приборовъ, измѣряющихъ силы тока и напряженія.

Два проводника оказываютъ другъ на друга опредѣленное механическое воздѣйствіе. Такъ, напримѣръ, два параллельные проводника,

по которымъ идутъ токи одного направленія, создаютъ, согласно фиг. 40а, силовой потокъ, окружающій оба проводника, и такъ какъ силовыя линіи согласно стр. 68, стремятся сократиться, подобно растянутой резиновой нити, то проводники сближаются одинъ съ другимъ. Слѣдовательно, параллельные проводники, по которымъ идутъ токи одного направленія, взаимно притягиваются.

На фиг. 42, наоборотъ, по обоимъ параллельнымъ проводникамъ проходятъ токи разнаго направленія, что видно изъ чертежа, гдѣ на поперечныхъ сѣченіяхъ проводниковъ установлены точка (передній конецъ стрѣлки) и крестъ (задній конецъ стрѣлки). Примѣнивъ правило Ампера, мы увидимъ, что силовыя линіи, создаваемыя обоими проводниками, въ пространствѣ между этими послѣдними, какъ имѣющія одно направленіе, складываются, линіи же, расположенныя снаружи, взаимно уравновѣшиваются. Силовыя линіи между проводниками, стремясь занять возможно больше мѣста, отталкиваютъ другъ друга и раздвигаютъ при этомъ проводники. Слѣдовательно, параллельные проводники, по которымъ идутъ токи по направленіямъ прямо противоположнымъ, взаимно отталкиваются.

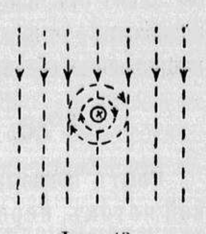


Фиг. 42.

На этомъ динамическомъ взаимодѣйствіи параллельныхъ проводниковъ основано устройство такъ называемаго динамометра для измѣренія токовъ и напряженія. Токъ проходитъ послѣдовательно неподвижную и подвижную катушки. Подобнымъ же образомъ устраивается и ваттметръ, у котораго неподвижная катушка, при прохожденіи по ней тока, оказываетъ механическое воздѣйствіе на подвижную катушку, включаемую въ напряженіе. Подвижная катушка стремится занять такое положеніе, при которомъ положительное направленіе создаваемаго ею силового потока совпадаетъ съ положительнымъ направленіемъ потока, создаваемаго неподвижной катушкой.

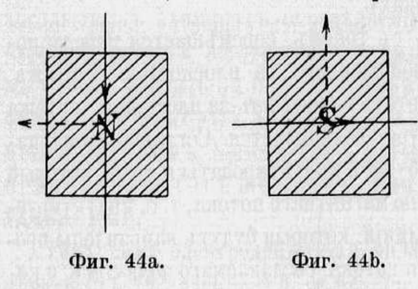
Особенно важно разсмотрѣть магнитное взаимодѣйствіе между прямолинейнымъ проводникомъ съ токомъ и однороднымъ полемъ. На фиг. 43 прямолинейный проводникъ, по которому токъ идетъ по направленію отъ насъ за плоскость чертежа, пересѣкаетъ плоскость чертежа перпендикулярно. Силовыя линіи магнитнаго поля располагаются параллельно плоскости чертежа и направляются сверху внизъ. Какъ видимъ, силовыя линіи, создаваемыя этимъ токомъ, ослабляютъ лѣвую часть поля и усиливаютъ правую. Такъ какъ согласно воззрѣнію Фарадея, по кото-

рому силовыя линіи оказываютъ давленіе въ направленіи перпендикулярномъ къ собственному направленію и стремятся взаимно предоставить другъ другу мѣсто, то на проводникъ, при данныхъ условіяхъ, будетъ дѣйствовать сила, которая перемѣститъ его влѣво. То же самое мы могли бы получить, основываясь на правилѣ Ампера, которое для даннаго случая должно выразить слѣдующимъ образомъ: Если вообразимъ наблюдателя, плывущаго по направленію тока и смотрящаго на сѣверный полюсъ, откуда исходятъ силовыя линіи, то полюсъ перемѣстится отъ наблюдателя влѣво. Если же этотъ послѣдній неподвиженъ, то проводникъ перемѣстится вправо.



Фиг. 43.

Направленіе силы опять перпендикулярно къ плоскости, проходящей черезъ проводникъ и силовыя линіи. На фиг. 44а, например, передъ сѣвернымъ полюсомъ, силовыя линіи котораго выходятъ изъ-за плоскости чертежа, находится проводникъ, по которому течетъ токъ по направленію стрѣлки. Если плыть по направленію тока и смотрѣть на сѣверный полюсъ, то перемѣщеніе проводника будетъ вправо по направленію пунктирной стрѣлки. На фиг. 44b находится проводникъ съ токомъ передъ южнымъ полюсомъ, въ который входятъ силовыя линіи. Силовыя линіи идутъ въ этомъ случаѣ за плоскость чертежа. Если, опять, плыть по направленію тока, т. е. какъ на фиг. 44b вправо, головой впередъ и смотрѣть на сѣверный полюсъ, откуда выходятъ силовыя линіи, т. е. въ пространство передъ плоскостью чертежа, то перемѣщеніе проводника будетъ вправо отъ насъ, т. е. кверху, по направленію пунктирной стрѣлки на фиг. 44b.



Фиг. 44а. Фиг. 44b.

S N

Фиг. 45.

Положимъ, проводникъ, по которому проходитъ токъ, занимаетъ горизонтальное положеніе въ нѣкоторой вертикальной плоскости и силовыя линіи пересѣкаютъ эту плоскость перпендикулярно справа налѣво (фиг. 45); тогда сѣверный полюсъ находится

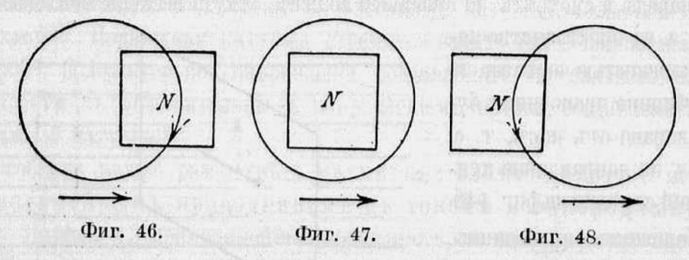
вправо, откуда исходятъ силовыя линіи. Если плыть опять по направленію тока и смотрѣть на этотъ сѣверный полюсъ, то полюсъ перемѣстился бы влѣво отъ насъ, т. е. внизъ. Если онъ неподвиженъ, а проводникъ подвиженъ, то перемѣщеніе произойдетъ вправо отъ насъ, т. е. вверхъ по направленію обозначенной пунктиромъ стрѣлки.

26. Электродвижущая сила индукціи.

Опытъ показываетъ, что какъ только и пока измѣняется силовой потокъ, пересѣкающій плоскость витка, въ виткѣ создается электродвижущая сила, которая «индуктируется» такимъ образомъ, что имѣетъ направленіе, при которомъ создаваемый ею токъ противодѣйствуетъ измѣненію силового потока.

Хотя во всѣхъ случаяхъ сначала создается электродвижущая сила, а затѣмъ уже токъ, но мы ради сокращенія въ дальнѣйшемъ будемъ говорить только объ индуктируемыхъ токахъ.

На фиг. 46 замкнутый контуръ съ токомъ перемѣщается передъ поверхностью сѣвернаго полюса, расположеннаго за плоскостью чертежа. Магнитный потокъ, пронизывающій этотъ витокъ изъ-за плоскости чертежа къ намъ, во время перемѣщенія контура увеличивается. Согласно вышеуказанному правилу, въ этомъ случаѣ будетъ индуктироваться токъ, который будетъ противодѣйствовать увеличенію магнитнаго потока, т. е. индуктируемый токъ будетъ создавать силовыя линіи, которыя будутъ направлены противоположно направленію магнитнаго потока, создаваемаго полюсомъ, и которыя пересѣкутъ плоскость витка по направленію отъ насъ за плоскость чертежа. Отсюда получаемъ, согласно правилу Ампера, направленіе тока, указанное на фиг. 46.



Фиг. 46. Фиг. 47. Фиг. 48.

На фиг. 47 магнитный потокъ, пронизывающій плоскость витка, остается въ теченіе одного момента безъ измѣненія, и потому индуктируемая электродвижущая сила равна нулю. Это имѣетъ мѣсто всегда въ томъ случаѣ, когда черезъ плоскость витка проникаетъ наибольшее число силовыхъ линій.

На фиг. 48 индуктируемый токъ имѣетъ направленіе, при которомъ онъ препятствуетъ уменьшенію магнитнаго потока, проникающаго черезъ плоскость витка.

Слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что на фиг. 46 и фиг. 48 стрѣлка, указывающая направленіе тока, хотя контуръ находится передъ сѣвернымъ полюсомъ, направлена въ обоихъ случаяхъ сверху внизъ, и витокъ на фиг. 46 проходится токомъ по часовой стрѣлкѣ, а на фиг. 48—противъ часовой стрѣлки. Слѣдовательно, токъ въ моментъ, представленный на фиг. 47, измѣняетъ свое направленіе на обратное.

Далѣе, величина индуктируемой электродвижущей силы, согласно опытнымъ даннымъ, пропорціональна скорости измѣненія силового потока, пересѣкающаго плоскость витка, т. е. пропорціональна частному $\frac{dN}{dt}$. Для того, чтобы множитель пропорціональности равнялся единицѣ, мы измѣримъ электродвижущую силу E въ абсолютныхъ единицахъ, опредѣляемыхъ нѣсколько дальше, а для того, чтобы въ расчетъ ввести также и направленіе электродвижущей силы, мы будемъ считать за положительный тотъ токъ, который будетъ создавать силовыя линіи одинаковаго направленія съ магнитнымъ потокомъ. Кромѣ того, электродвижущей силѣ мы будемъ приписывать тотъ же знакъ, какимъ обладаетъ и токъ, ею создаваемый.

Такъ какъ электродвижущая сила создаетъ токъ, который противодѣйствуетъ увеличенію dN силовыхъ линій, то она имѣетъ знакъ, противоположный возрастанію силового потока. При ξ послѣдовательно включенныхъ виткахъ электродвижущая сила въ абсолютныхъ единицахъ будетъ:

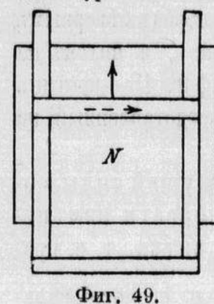
$$E = -\xi \cdot \frac{dN}{dt}.$$

Это уравненіе имѣетъ мѣсто и въ томъ случаѣ, когда силовой потокъ, пересѣкающій плоскость витка, уменьшается. Въ этомъ случаѣ dN отрицательно и электродвижущая сила поэтому положительна, т. е. индуктируемый токъ создаетъ силовыя линіи, которыя внутри витка одного направленія съ первоначальнымъ магнитнымъ потокомъ.

Вышеуказанный законъ индукціи совмѣстно съ закономъ сохраненія энергіи составляетъ основаніе всего ученія объ электричествѣ.

Изъ уравненія для E получаемъ абсолютную единицу электродвижущей силы. Послѣдняя будетъ индуктироваться въ виткѣ, когда число силовыхъ линій, замыкаемое этимъ виткомъ, измѣнится на одну линію. Эта

абсолютная единица для практическихъ цѣлей очень мала. Поэтому за практическую единицу выбираютъ 10^8 такихъ единицъ, которую называютъ вольтомъ. Тогда электродвижущая сила въ вольтахъ выразится слѣдующимъ уравненіемъ:



Фиг. 49.

$$E = -\xi \cdot \frac{dN}{dt} \cdot 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

Процессъ индуктированія электродвижущей силы можно особенно наглядно показать на случаѣ, представленномъ на фиг. 49. Здѣсь проводникъ въ видѣ стержня, до той поры безъ тока, длиною l перемѣщается въ двухъ направляющихъ со скоростью $v = \frac{ds}{dt}$ см/сек. Направляющія внизу соединены металлически и образуютъ съ проводникомъ замкнутый контуръ. Проводникъ при своемъ движеніи пересѣкаетъ силовыя линіи магнитнаго поля H, которое создается сѣвернымъ полюсомъ, расположеннымъ за плоскостью чертежа, и силовыя линіи котораго идутъ, слѣдовательно, изъ-за плоскости чертежа по направленію къ намъ [1]).

За время dt проводникъ пройдетъ путь ds; тогда описанная имъ площадь будетъ lds, и увеличеніе числа силовыхъ линій, которыя пересѣкутъ плоскость витка, составитъ:

$$dN = H \cdot l \cdot ds.$$

Тогда, такъ какъ число витковъ $\xi = 1$, электродвижущая сила будетъ:

$$E = -\frac{dN}{dt} = -H \cdot l \cdot \frac{ds}{dt}.$$

Если, теперь, вмѣсто $\frac{ds}{dt}$ подставимъ скорость v и пренебрежемъ знакомъ, для чего оставимъ неопредѣленнымъ направленіе скорости, тогда

$$E = H \cdot l \cdot v.$$

Отсюда абсолютная единица электродвижущей силы будетъ индуктироваться тогда, когда проводникъ длиною въ 1 см. будетъ пересѣкать перпендикулярно силовыя линіи поля напряженія 1 со скоростью 1 см/сек.

---

[1]) И въ этомъ случаѣ электродвижущая сила индуктируется вслѣдствіе измѣненія числа силовыхъ линій, пересѣкающихъ плоскость витка. Этотъ процессъ нагляднѣе можно объяснить тѣмъ, что силовыя линіи пересѣкаются проводникомъ. Поэтому это положеніе удержано и въ дальнѣйшемъ, хотя необходимость его признается не всѣми.

Электродвижущая сила въ вольтахъ будетъ

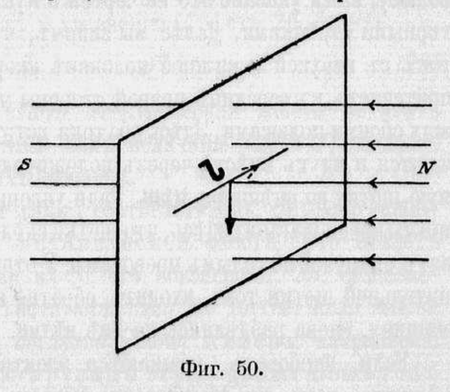
$$E = H \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

Если движеніе происходитъ не перпендикулярно къ плоскости, проходящей черезъ проводникъ и силовая линіи или проводникъ расположенъ не перпендикулярно силовымъ линіямъ, то для скорости v и длины l необходимо брать перпендикулярныя составляющія, при чемъ l обозначаетъ, при нѣсколькихъ послѣдовательно включенныхъ проводникахъ, полную длину, въ сантиметрахъ, индуктируемаго проводника.

Теперь мы въ состояніи опредѣлить электродвижущую силу динамомашины. Положимъ, необходимо найти наибольшую электродвижущую силу машины перемѣннаго тока, т. е. электродвижущую силу въ тотъ моментъ, когда проволки якоря располагаются противъ середины полюса. При этомъ пусть число проволокъ будетъ 400, длина индуктируемаго проводника 30 см. и напряженіе поля передъ серединой полюса 5 000. Тогда, при окружной скорости 20 м/сек = 2 000 см/сек, электродвижущая сила будетъ:

$$E = 5\,000 \cdot 30 \cdot 400 \cdot 2\,000 \cdot 10^{-8} = 1\,200 \text{ вольтъ}.$$

Направленіе электродвижущей силы мы получаемъ на фиг. 49 изъ увеличенія и уменьшенія числа силовыхъ линій, замкнутыхъ однимъ виткомъ. Проще это направленіе опредѣляется при прямолинейномъ проводникѣ изъ правила Фарадея, по которому, если плыть по направленію силовыхъ линій и смотрѣть въ сторону движенія проводника, то электродвижущая сила пойдетъ вправо отъ наблюдателя.



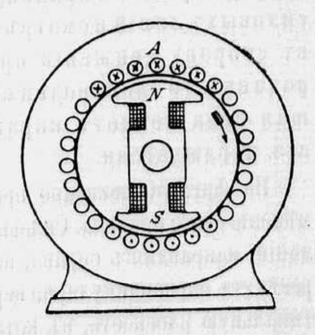
Фиг. 50.

На фиг. 50 показано примѣненіе этого правила. Силовыя линіи, направляясь справа, пересѣкутъ перпендикулярно вертикальную плоскость, въ которой движется сверху внизъ горизонтальный проводникъ l. Если плыть теперь справа налѣво и смотрѣть внизъ, то вытянутая правая рука укажетъ направленіе электродвижущей силы. Послѣдняя указана на фигурѣ пунктирной стрѣлкой.

Мы можемъ это правило Фарадея тотчасъ же примѣнить къ якорю динамомашины. На фиг. 51 имѣется желѣзный полый цилиндръ или якорь, снабженный замкнутой обмоткой изъ изолированной мѣдной проволоки и вращающійся по направленію стрѣлки между полюсами электромагнита N и S. Силовыя линіи, выходя изъ сѣвернаго полюса, расходятся направо и налѣво черезъ желѣзо якоря и идутъ въ южный полюсъ, такъ что внутреннее пустое пространство почти свободно отъ силовыхъ линій. Поэтому пересѣченіе силовыхъ линій происходитъ только на внѣшней боковой поверхности барабана. Примѣняя правило Фарадея, получаемъ, что индуктированная электродвижущая сила въ проволокахъ передъ сѣвернымъ полюсомъ направляется отъ насъ за плоскость чертежа, а въ проволокахъ передъ южнымъ полюсомъ изъ-за плоскости чертежа къ намъ. Когда токъ установится, то при вышеуказанномъ вращеніи на лицевой сторонѣ якоря онъ пойдетъ, удаляясь отъ южнаго полюса и приближаясь къ сѣверному полюсу, какъ указано это на чертежѣ пунктирными стрѣлками. Далѣе мы видимъ, что токъ съ верхней и нижней половинѣ якоря притекаетъ къ серединѣ правой стороны между обоими полюсами. Здѣсь оба тока встрѣчаются и идутъ вмѣстѣ черезъ положительную щетку во внѣшнюю цѣпь. Ради упрощенія мы предполагаемъ здѣсь, что щетки скользятъ снаружи по голымъ проводамъ. У отрицательной щетки токъ входитъ обратно въ машину, снова раздѣляясь на двѣ вѣтви.

Фиг 51.

Если, наоборотъ, вращаются электромагниты, какъ это обыкновенно бываетъ у машинъ перемѣннаго тока, то въ правило Фарадея необходимо тогда ввести направленіе относительнаго вращенія проводниковъ. Положимъ, на фиг. 52 сѣверный полюсъ вращается вправо: это равносильно случаю вра-



Фиг. 52.

щенія проволокъ передъ сѣвернымъ полюсомъ влѣво. Вообразимъ себя плывущими, напримѣръ, при A по положительному направленію силовыхъ линій, т. е. снизу наверхъ, и будемъ смотрѣть по направленію относительнаго движенія проводниковъ, т. е. на чертежѣ налѣво. Тогда электродвижущая сила направляется вправо отъ насъ, т. е. за плоскость чертежа, пересѣкая эту послѣднюю. Слѣдовательно, на проволокахъ, расположенныхъ передъ сѣвернымъ полюсомъ, мы должны поставить крестики. Подобнымъ же образомъ мы получимъ, что въ проволокахъ, расположенныхъ передъ южнымъ полюсомъ, при тѣхъ же условіяхъ электродвижущая сила направляется изъ-за плоскости чертежа.

27. Превращеніе механической работы въ электрическую.

Разсмотримъ теперь случай, когда токъ въ какой нибудь катушкѣ создается индуктируемой электродвижущей силой, т. е. когда направленіе тока будетъ одинаково съ электродвижущей силой. Тогда катушка представитъ собой генераторъ, который создаетъ электрическую работу. За единицу измѣренія этой работы мы выберемъ дино-сантиметръ или эргъ, т. е. работу, произведенную силою въ одну дину вдоль пути длиною въ одинъ сантиметръ. Если $\boldsymbol{E}$ будетъ электродвижущая сила, выраженная въ абсолютныхъ единицахъ, и $\boldsymbol{J}$ сила тока въ единицахъ, о которыхъ будетъ сказано дальше, при чемъ эта единица будетъ выбрана такимъ образомъ, что коэффиціентъ пропорціональности ξ нижеприведеннаго уравненія будетъ равенъ 1, то электрическая работа, создаваемая катушкой, согласно уравненію (8) стр. 14 и уравненію (16) стр. 26, будетъ:

$$dA = \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{J} \cdot dt = -\xi \cdot \boldsymbol{J} \cdot d\boldsymbol{N} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (29)$$

Несмотря на отрицательный знакъ, электрическая работа въ этомъ случаѣ будетъ положительною, такъ какъ величины $d\boldsymbol{N}$ и $\boldsymbol{J}$, согласно стр. 76, будутъ противоположныхъ знаковъ.

Создаваемая электрическая работа соотвѣтствуетъ, согласно закону сохраненія энергіи, затраченной механической работѣ. Это станетъ яснѣе, когда мы обратимъ вниманіе на то, что, согласно ст. 25, создаваемый токъ и силовое поле взаимодѣйствуютъ одно на другое. Если мы на фигурахъ статьи 26 опредѣлимъ, согласно закону Ампера, направленіе этой силы, то увидимъ, что индуктируемый этимъ движеніемъ токъ препятствуетъ перемѣщенію проводника (законъ Ленца).

Такимъ образомъ, умножая силу $\boldsymbol{f}$ на путь ds, мы получимъ затраченную механическую работу:

$$dA = \boldsymbol{f} \cdot ds.$$

Приравнивая механическую работу электрической, имѣемъ:

$$dA = f \cdot ds = -\xi \cdot J \cdot dN.$$

Отсюда можно опредѣлить размѣры силы f для случая, представленнаго на фиг. 49, гдѣ прямолинейный проводникъ образуетъ съ силовыми линіями прямой уголъ.

Въ этомъ случаѣ $dN = H \cdot l \cdot ds$ и число витковъ $\xi = 1$. Если мы ради упрощенія пренебрежемъ знакомъ, то мы получимъ вышеуказанное уравненіе для dA:

$$f = H \cdot J \cdot l \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (30)$$

Сила, съ которою проводникъ съ токомъ противодѣйствуетъ перемѣщенію, будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше напряженіе поля, сила тока и длина проводника. Изъ уравненія (30) мы получаемъ абсолютную единицу силы тока.

Послѣдняя создается въ томъ случаѣ, когда проводникъ длиною въ сантиметръ, перемѣщаясь перпендикулярно силовымъ линіямъ поля напряженія равнаго единицѣ, развиваетъ силу равную одной динѣ. Такъ какъ для практическихъ цѣлей эта единица очень велика, то выбрали одну десятую этой единицы и назвали ее амперомъ.

Слѣдовательно, число амперъ всегда въ десять разъ больше эквивалентнаго числа абсолютныхъ единицъ. Если i сила тока въ амперахъ, то уравненіе (30) приметъ видъ:

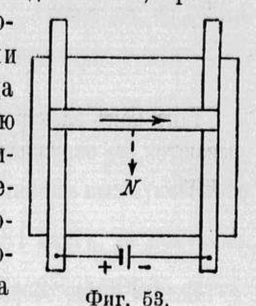
$$f = H \cdot \frac{i}{10} \cdot l.$$

Это собственно будетъ сила, которая затрачивается при движеніи проводника въ силовомъ полѣ на то, чтобы преодолѣть силу, съ которою проводникъ съ токомъ сопротивляется движенію. Вообще это будетъ сила взаимодѣйствія между проводникомъ съ токомъ и силовымъ полемъ.

28. Превращеніе электрической работы въ механическую.

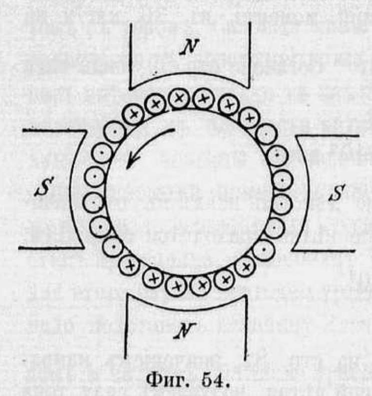
На фиг. 53 къ проводнику въ видѣ стержня длиною l, перемѣщающемуся по направляющимъ передъ сѣвернымъ полюсомъ электромагнита, подводится токъ силою J. Направленіе тока и силового поля одинаково съ фиг. 49. Вмѣсто того, чтобы, какъ на фиг. 49, перемѣщать кверху проводникъ противъ силы взаимодѣйствія между нимъ и силовымъ полемъ, мы предоставимъ ему самому въ этомъ случаѣ перемѣщаться внизъ согласно правилу Ампера. Такъ какъ при этомъ проводникъ пересѣчетъ силовыя линіи, то въ немъ, какъ раньше, будетъ индуктироваться электродвижущая

сила, направленіе которой, въ виду измѣненія движенія по сравненію съ фиг. 49, будетъ обратнымъ. Электродвижущая сила, согласно правилу Фарадея, дѣйствуетъ въ проводѣ справа налѣво, слѣдовательно, противъ тока. Поэтому ее можно назвать противодѣйствующей электродвижущей силой или просто противоэлектродвижущей силой. Тогда токъ въ этомъ случаѣ будетъ создаваться разностью между напряженіемъ элемента и противоэлектродвижущей силой. Такъ какъ часть E напряженія элемента затрачивается на преодолѣніе противоэлектродвижущей силы, то элементъ за время dt производитъ электрическую работу $E \cdot J \cdot dt$. Эта работа превращается въ механическую работу проводника, который вдоль пути ds развиваетъ силу $f = H \cdot J \cdot l$ (принципъ электродвигателя). Теперь мы въ состояніи опредѣлить число оборотовъ, расходъ тока и мощность электродвигателя, нагрузка котораго задана. Положимъ, по окружности желѣзнаго барабана (якоря) располагаются 944 проволоки, изъ которыхъ двѣ трети находятся противъ полюсовъ, фиг. 54.



Фиг. 53.

Длина якоря пусть будетъ 24 см, діаметръ якоря $D = 40$ см, напряженіе поля передъ полюсами $A = 7\,000$ и напряженіе сѣти $e = 500$ вольтъ. Обмотка распадается на двѣ параллельныя вѣтви, которыя соединены такимъ образомъ, что электродвижущія силы, индуктирующіяся въ проволкахъ каждой вѣтви, въ каждый моментъ складываются. Направленіе тока во всѣхъ проволокахъ таково, что вращающіе моменты, создаваемые отдѣльными проводниками, въ каждый моментъ дѣйствуютъ въ одномъ и томъ же направленіи. Требуется опредѣлить число оборотовъ, расходъ тока, расходъ мощности электродвигателя въ томъ случаѣ когда этотъ послѣдній долженъ развить вращающій моментъ $M_d = 30$ клгмтр.



Фиг. 54.

При предположеніи, что омическое сопротивленіе двигателя очень невелико, все напряженіе сѣти пойдетъ на преодолѣніе противоэлектродвижущей силы E, поэтому $E = 500$ вольтъ. Такъ какъ якорь распадается на двѣ параллельныя вѣтви и двѣ трети всѣхъ 944 проволокъ находятся передъ полюсами, то число индуктируемыхъ проводниковъ каждой изъ

параллельныхъ вѣтвей будетъ $\frac{1}{2}\cdot\frac{2}{3}\cdot 944$, т. е. индуктируемая длина проводниковъ l каждой изъ обѣихъ параллельныхъ вѣтвей, при длинѣ якоря въ 24 см, составитъ:

$$l = \frac{1}{2}\cdot\frac{2}{3}\cdot 944\cdot 24 = 7\,500 \text{ см}.$$

Такъ какъ электродвижущія силы въ параллельныхъ вѣтвяхъ не складываются, то окружная скорость v, согласно уравненію (17) на стр. 28, будетъ:

$$v = \frac{E\cdot 10^8}{H\cdot l} = 955 \text{ см/сек}.$$

Если n число оборотовъ въ минуту, то при діаметрѣ $D = 40$ см, согласно извѣстному уравненію механики, имѣемъ:

$$n = \frac{v\cdot 60}{D\cdot\pi} = 456.$$

Опредѣливши число оборотовъ, намъ остается теперь изъ вращающаго момента найти расходъ тока. Для этого мы опредѣлимъ силу тяги на окружности, для чего раздѣлимъ вращающій моментъ въ 30 клг/м на радіусъ $\frac{20}{100}$ м, и получимъ тогда 150 клг. * Согласно стр. 59, сила тяги въ динахъ будетъ:

$$150\cdot 981\,000 = 1{,}47\cdot 10^8 \text{ динъ}.$$

Эта сила тяги создается совокупностью дѣйствія всѣхъ въ отдѣльности вѣтвей тока. Слѣдовательно, на каждую вѣтвь приходится сила тяги:

$$f = \frac{1{,}47\cdot 10^8}{2}.$$

Воспользовавшись уравненіемъ (30) на стр. 82, значеніемъ напряженія поля H и длиною проводника l одной вѣтви, получаемъ силу тока въ каждомъ отдѣльномъ проводникѣ:

$$J = \frac{f}{H\cdot l} = \frac{1{,}47\cdot 10^8}{2\cdot 7000\cdot 7500} = 1{,}4.$$

Число амперъ въ десять разъ больше числа абсолютныхъ единицъ, кромѣ того, какъ мы знаемъ, токъ въ якорѣ распадается на двѣ вѣтви, поэтому полный токъ въ якорѣ въ амперахъ будетъ:

$$i = 2\cdot 10\cdot J = 28 \text{ амперъ}.$$

Наконецъ, расходъ энергіи равенъ:

$$e\cdot i = 500\cdot 28 = 14\,000 \text{ ваттъ}.$$

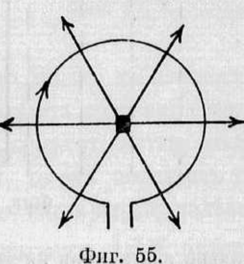
Теперь посмотримъ, дѣйствительно ли сообщаемая электрическая мощность равна механической мощности. Механическая мощность, согласно извѣстному закону механики, равна произведенію вращающаго момента M_d на угловую скорость ω, т. е. равна

$$M_d\cdot\omega = M_d\cdot 2\pi\cdot\frac{n}{60}\,\frac{\text{клгмтр}}{\text{сек}}.$$

Если мы, теперь, въ предыдущее выраженіе подставимъ вышеуказанное значеніе M_d и n и замѣтимъ, что $1\frac{\text{клгмтр}}{\text{сек.}} = 9{,}81$ ваттъ, то получимъ въ этомъ случаѣ механическую мощность равную также 14 000 ваттъ. Такимъ образомъ, законъ сохраненія энергіи здѣсь соблюденъ.

29. Напряженіе поля внутри витка и внутри катушки.

Для опредѣленія силы, съ которою токъ J дѣйствуетъ на сѣверный полюсъ 1, помѣщенный въ центрѣ контура съ токомъ радіуса r, найдемъ, наоборотъ, силу, съ которою полюсъ дѣйствуетъ на витокъ съ токомъ. Силовыя линіи этого послѣдняго расходятся въ пространство по радіусамъ, но для насъ интересны только тѣ изъ нихъ, которыя располагаются въ плоскости витка (фиг. 55). Такъ какъ всѣ частицы проводника образуютъ съ этими силовыми линіями прямой уголъ и напряженіе поля, создаваемаго полюсомъ у всѣхъ частицъ проводника, согласно стр. 60, равно $1/r^2$, то для этого случая пригодно уравненіе (30) на стр. 82. При этомъ вмѣсто l надо подставить величину $2r\pi$. Тогда сила взаимодѣйствія между полюсомъ и виткомъ, согласно уравненію (30), будетъ $\frac{1}{r^2}\cdot J\cdot 2r\pi = \frac{2\pi\cdot J}{r}$.


Фиг. 55.

Эта сила, направленная перпендикулярно къ плоскости витка, — согласно закону: дѣйствіе равно противодѣйствію, — равна силѣ взаимодѣйствія витка на полюсъ 1, которую мы раньше обозначали напряженіемъ поля H. Такимъ образомъ, эта послѣдняя въ центрѣ витка будетъ:

$$H = \frac{2\pi J}{r}.$$

Этой закономѣрной связью пользуются въ тангенсъ-гальванометрахъ (буссоляхъ) для измѣренія силы тока. Помѣстимъ, теперь, въ центрѣ витка

магнитную стрѣлку, магнитная ось которой очень мала по сравненію съ радіусомъ витка. Тогда мы можемъ принять, что полюсы магнитной стрѣлки при всѣхъ положеніяхъ послѣдней находятся въ центрѣ витка. Расположимъ теперь плоскость витка вертикально и въ магнитномъ меридіанѣ. Тогда при отсутствіи тока напряженіе магнитной стрѣлки совпадаетъ съ плоскостью контура. Если по контуру пойдетъ токъ, то стрѣлка отклонится на уголъ α, и вслѣдствіе сопротивленія, оказываемаго горизонтальными составляющими h земного магнетизма и силового поля, создаваемаго токомъ, приходитъ въ состояніе покоя.

Фиг. 56.

На фиг. 56 витокъ представленъ въ видѣ горизонтальной проэкціи и ради ясности стрѣлка увеличена въ нѣсколько разъ. На полюсъ стрѣлки m горизонтальная составляющая земного магнитизма дѣйствуетъ съ силою $m \cdot h$, вдоль же направленія вращенія дѣйствуетъ только часть ея $m \cdot h \cdot \sin \alpha$. Токъ, согласно вышеуказанному уравненію для H, дѣйствуетъ съ силою

$$f = m \cdot H = m \cdot \frac{2\pi \cdot J}{r},$$ вдоль же направленія вращенія дѣйствуетъ только слагающая ея $m \frac{2\pi \cdot J}{r} \cdot \cos \alpha$. Въ виду равновѣсія эти слагающія вдоль направленія вращенія другъ друга уравновѣшиваютъ, и тогда

$$m \cdot h \cdot \sin \alpha = m \cdot \frac{J}{r} \cdot 2\pi \cdot \cos \alpha.$$

Въ этомъ уравненіи m сокращается. Такъ какъ магнитная ось тоже не входитъ въ предыдущее уравненіе, то показанія буссоли вовсе не зависятъ отъ свойствъ стрѣлки. Опредѣляя изъ этого уравненія J, получаемъ

$$J = \frac{h \cdot r}{2\pi} \operatorname{tng} \alpha.$$

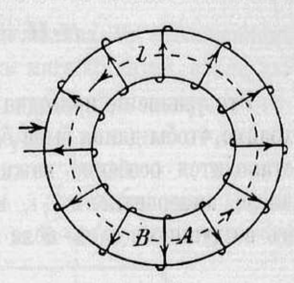
Поэтому вышеуказанный приборъ называютъ тангенсъ-гильванометромъ или тангенсъ-буссолью. Такъ какъ число амперъ въ десять разъ больше

числа абсолютныхъ единицъ, то для силы тока въ амперахъ будемъ имѣть

$$i = \frac{10 \cdot h \cdot r}{2\pi} \operatorname{tng} \alpha.$$

Если, теперь, извѣстна горизонтальная составляющая земного магнетизма для даннаго мѣста, то можно при помощи ея, въ связи съ величинами r и α, опредѣлить силу тока. И, обратно, можно при помощи вывѣреннаго амперметра опредѣлить горизонтальную составляющую.

Въ вышеуказанномъ случаѣ, когда мы имѣли дѣло съ однимъ единственнымъ виткомъ, опредѣлить напряженіе поля внутри этого послѣдняго было не трудно. Для того, чтобы опредѣлить это послѣднее для изображенной на фиг. 57 кольцевой катушки, мы пропустимъ сначала токъ J черезъ одинъ витокъ, напримѣръ черезъ витокъ, расположенный въ самомъ низу, и опредѣлимъ работу, которую мы должны затратить на перемѣщеніе сѣвернаго полюса 1 вдоль пути l отъ B къ A.



Фиг. 57.

Точки A и B должны располагаться безконечно близко къ плоскости витка. Если полюсъ 1 находится у B, то онъ посылаетъ половину своего силового потока, т. е. 2π силовыхъ линій, сквозь плоскость витка, слѣва направо. Если же полюсъ находится при точкѣ A, то онъ посылаетъ то же самое число силовыхъ линій 2π черезъ плоскость витка справа налѣво. Слѣдовательно, измѣненіе потока, окружаемаго виткомъ, $\int dN$, будетъ равно 4π. Мы предполагаемъ, что токъ J во время этого процесса будетъ постояннымъ. Электрическая работа, которая создается полнымъ измѣненіемъ силового потока и требуетъ равновеликой затраты механической работы, получается, согласно уравненію (29) на стр. 81, равной, если примемъ число витковъ $\xi = 1$ и ради упрощенія не будемъ обращать вниманіе на знакъ:

$$A = \int J \cdot dN = 4\pi J.$$

Это выраженіе представляетъ собой работу, которую необходимо затратить на перемѣщеніе сѣвернаго полюса 1 противъ силовыхъ линій витка по пути, обозначенному пунктирной линіей, отъ B къ A, при чемъ, безразлично, по какому пути согласно характеру всего нашего разсужденія, безразлично, по какому пути произойдетъ это перемѣщеніе, лишь бы полюсъ не выходилъ изъ предѣ-

ловъ плоскости витка. Эту работу называютъ линейнымъ интеграломъ магнитодвижущей силы.

Если, теперь, токъ J заставимъ пройти всѣ ξ витковъ, то произведенная работа будетъ въ ξ разъ больше, т. е. будетъ равна $4\pi\cdot\xi\cdot J$. Она будетъ произведена вдоль пути l. Преодолѣваемая при этомъ сила во всѣхъ точкахъ пути будетъ одинакова. Раздѣливъ работу на путь, мы получимъ, такимъ образомъ, силу H, дѣйствующую на полюсъ 1, или число силовыхъ линій на квадратный сантиметръ. Отсюда имѣемъ:

$$H=\frac{4\pi\cdot\xi\cdot J}{l}=\frac{0,4\cdot\pi\cdot\xi\cdot i}{l}\quad\ldots\ldots\ldots\quad(31)$$

Это уравненіе пригодно также для прямыхъ катушекъ, при чемъ необходимо, чтобы длина была больше діаметра. Въ этомъ случаѣ это уравненіе становится особенно важнымъ, такъ какъ оно позволяетъ опредѣлить число ампервитковъ $\xi\cdot i$, которое необходимо для созданія вдоль пути l въ воздушномъ слоѣ поля напряженія H.

30. Кривыя намагничиванія.

Число силовыхъ линій на квадратный сантиметръ при прочихъ равныхъ условіяхъ значительно увеличивается, когда внутри катушки находится вмѣсто воздуха желѣзо. Соленоидъ становится тогда электромагнитомъ. При этомъ можно предположить, что столь большое число силовыхъ линій въ желѣзѣ какъ бы индуктируется тѣми силовыми линіями, которыя находились бы внутри катушки при существованіи тамъ только воздуха.

Поэтому напряженіе поля или число силовыхъ линій на 1 квадратный сантиметръ въ воздухѣ, которое обозначаютъ буквою H, называютъ также намагничивающей силой. Число же силовыхъ линій на 1 квадратный сантиметръ въ желѣзѣ называютъ магнитной индукціей и обозначаютъ буквою B. При этомъ необходимо указать на то, что индукція B заключаетъ въ себѣ какъ число силовыхъ линій вновь возникшихъ въ желѣзѣ, такъ и число линій, существовавшихъ внутри катушки до вдвиганія желѣза.

Такое возрастаніе числа силовыхъ линій въ желѣзѣ, при прочихъ равныхъ условіяхъ, заставляетъ приписывать желѣзу болѣе значительную магнитную проницаемость, чѣмъ воздуху. Проницаемость μ, какъ ее обозначаютъ, указываетъ, слѣдовательно, во сколько разъ въ желѣзѣ, при прочихъ равныхъ условіяхъ, силовыхъ линій больше, чѣмъ въ воздухѣ или во сколько разъ желѣзо проводитъ силовыя линіи лучше воздуха. Отсюда получимъ:

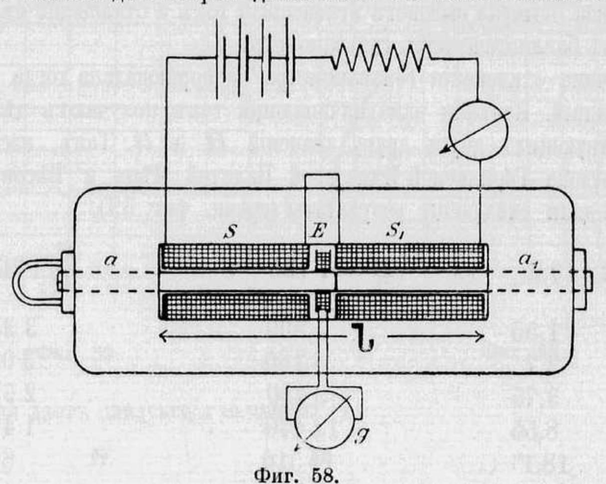
$$B=\mu\cdot H\quad\ldots\ldots\ldots\ldots\quad(32)$$

или

$$\mu=\frac{B}{H}.$$

Откуда магнитная проницаемость для воздуха равна 1 и $B=H$. Безвоздушное пространство въ магнитномъ отношеніи подвержено тѣмъ же законамъ, что и воздухъ.

Величина μ зависитъ прежде всего отъ сорта желѣза. Въ отожженномъ листовомъ желѣзѣ для якорей динамо или въ мягкой литой стали для



Фиг. 58.

электромагнитовъ динамо μ можетъ иногда превышать число 3 000. Кромѣ того значеніе μ у одного и того же сорта желѣза существенно измѣняется со степенью намагничиванія.

Опытное изслѣдованіе состоитъ въ томъ, что силовыя линіи, возникающія въ желѣзѣ, пересѣкаютъ вспомогательной катушкой (фиг. 58). Для этой цѣли испытываемый желѣзный стержень дѣлаютъ составнымъ изъ двухъ частей, которыя пропускаютъ черезъ отверстія a и a_1 массивной желѣзной рамы, сквозь намагничивающія катушки S и S_1 и вспомогательную катушку E. Черезъ катушки S и S_1 пускаютъ токъ i и, зная число витковъ и длину l желѣзнаго стержня, опредѣляютъ величину напряженія:

$$H=\frac{0,4\,\pi\cdot\xi\cdot i}{l}.$$

При этомъ подъ l надо подразумѣвать только ту часть желѣзнаго стержня, которая заключена между отрѣзками рамы, такъ какъ силовыя линіи, войдя въ раму, тотчасъ же раздѣляются на двѣ половины. Часть желѣзнаго стержня, находящаяся въ отверстіяхъ a и a_1, не проходится всѣми силовыми линіями, и потому она не принимается во вниманіе, какъ и путь силовыхъ линій черезъ самую раму, которая не представляетъ собою значительнаго сопротивленія для прохожденія силовыхъ линій.

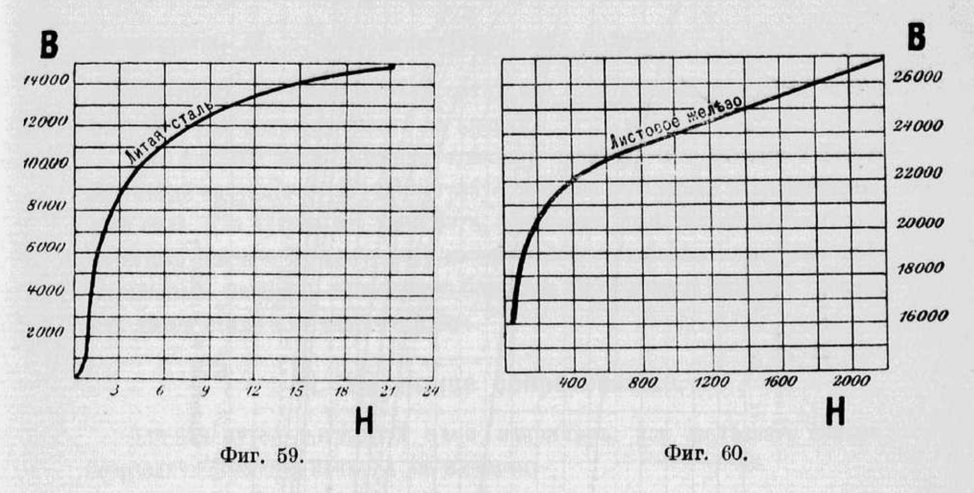
Если, теперь, выдвинуть вонъ одну половину желѣзнаго стержня, то пружинка одновременно вытянетъ вспомогательную катушку изъ раіона расположенія силовыхъ линій, и послѣдняя пересѣчетъ всѣ силовыя линіи, существовавшія въ желѣзѣ; въ катушкѣ тогда индуктируется электродвижущая сила, которая вызоветъ мгновенный токъ и отклоненіе въ такъ называемомъ баллистическомъ гальванометрѣ g.

Величина отклоненія гальванометра пропорціональна тогда числу силовыхъ линій. Измѣняя намагничивающій токъ, получаютъ цѣлый рядъ соотвѣтствующихъ другъ другу значеній $\boldsymbol{H}$ и $\boldsymbol{B}$. Такъ, изслѣдованія стали Грузона Германской Имперской Палатой Мѣръ и Вѣсовъ Reichsanstalt дали слѣдующіе результаты (сравн. фиг. 59).

$\boldsymbol{H}=0{,}9$	$\boldsymbol{B}=1\,130$	$\mu=\dfrac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{H}}\,1\,260$
1,55	5 200	3 350
2,7	8 160	3 020
3,75	9 480	2 530
8,55	12 440	1 460
18,1	14 510	800
34,5	15 710	460
82,7	17 150	210
145,3	18 200	130

Изъ этой таблицы явствуетъ, что въ данномъ случаѣ при слабомъ намагничиваніи получается незначительная проницаемость. Небольшая намагничивающая сила, такимъ образомъ, оказываетъ слабое воздѣйствіе на частицы желѣза. При болѣе сильномъ намагничиваніи, напримѣръ, для $\boldsymbol{B}$ отъ 5 000 до 9 000, таблица показываетъ, что между намагничивающею силой $\boldsymbol{H}$ и индукціей $\boldsymbol{B}$ существуетъ почти пропорціональность. Наконецъ, послѣдующее усиленіе намагничивающаго тока вызываетъ почти незамѣтное увеличеніе числа силовыхъ линій въ желѣзѣ. Желѣзо, какъ говорятъ, насыщено. Указать же точно мѣсто, гдѣ происходитъ насыщеніе, конечно, нельзя.

Нанесемъ, теперь, намагничивающую силу $\boldsymbol{H}$ на координатныя оси по оси абсциссъ, а индукцію $\boldsymbol{B}$ — по оси ординатъ; тогда получимъ такъ называемую **кривую намагничиванія**, которая для вышеупомянутой литой стали представлена на фиг. 59. Рядомъ, на фиг. 60, вычерчена верхняя часть кривой намагничиванія листового желѣза для якорей динамо, которая представляетъ собою для насъ особенный интересъ, потому что для работы динамомашины безъ искренія необходимо доводить зубцы якоря до возможно сильнаго насыщенія.



Фиг. 59. Фиг. 60.

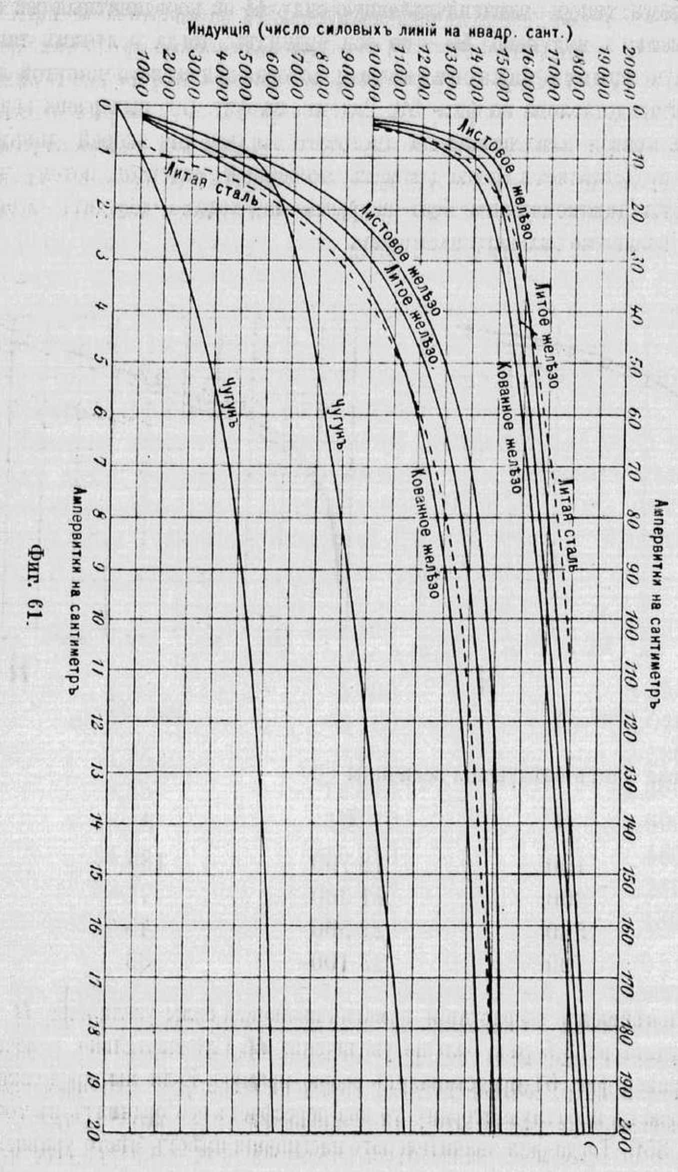
Кривая даетъ слѣдующія величины [1]):

$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{B}$	μ
100	18 700	187
300	21 300	71
500	22 500	45
700	23 100	33

При дальнѣйшемъ возрастаніи намагничивающей силы увеличеніе $\boldsymbol{B}$ все время будетъ въ 2,5 раза больше увеличенія $\boldsymbol{H}$. Слѣдовательно, конечная часть кривой фиг. 61 представляетъ собою прямую. Если мы продолжимъ послѣднюю въ обратную сторону, то она пересѣчетъ ось ординатъ въ точкѣ $\boldsymbol{B}=21\,350$. Тогда для значительнаго насыщенія имѣетъ мѣсто уравненіе:

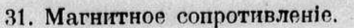
$$\boldsymbol{B}=21\,350+2{,}5\,\boldsymbol{H}.$$

[1]) Ср. *ETZ.* 1901, стр. 769.



Фиг. 61.

Для практическихъ цѣлей кривыми намагничиванія нельзя пользоваться непосредственно, такъ какъ на нихъ не можетъ быть отсчитано необходимое для данной индукціи число амперавитковъ на 1 сантиметръ пути



силовыхъ линій. Для этого необходимо всегда, согласно уравненію (31) стр. 88, получающуюся величину $\boldsymbol{H}$ раздѣлить на $0{,}4\pi$. Если обозначимъ, теперь, амперавитки черезъ X, то амперавитки, приходящіеся на сантиметръ пути въ желѣзѣ, будутъ:

$$\frac{X}{l} = \frac{\xi \cdot i}{l} = \frac{\boldsymbol{H}}{0{,}4\,\pi} = 0{,}8\,\boldsymbol{H}.$$

Чтобы упростить этотъ расчетъ, на фиг. 61 нанесены по оси абсциссъ не значенія $\boldsymbol{H}$, а пропорціональныя имъ величины $\frac{X}{l}$. Тогда число амперавитковъ на сантиметръ, необходимое для данной индукціи, можно получать уже непосредственно на кривой.

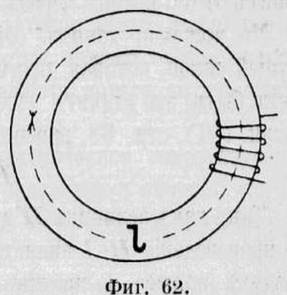
Изъ фиг. 61 видно, что для кованаго желѣза, литой стали и литого желѣза до индукціи $\boldsymbol{B} = 14\,000$ требуется очень небольшая намагничивающая сила. Для чугуна же, наоборотъ, получаемъ значительно менѣе благопріятныя условія. Въ силу этого магнитный остовъ болѣе или менѣе значительныхъ машинъ, несмотря на большую дороговизну, дѣлаютъ теперь изъ литой стали или литого желѣза.

31. Магнитное сопротивленіе.

Для замкнутой магнитной цѣпи, напримѣръ, для желѣзнаго кольца, безразлично, распредѣляются ли амперавитки по всей окружности или, какъ на фиг. 62, сдвинуты на одной только части ея. Въ обоихъ случаяхъ, согласно уравненію (31) и (32) на стр. 88 и 89, получаемъ:

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H} = \frac{\mu \cdot 0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i}{l},$$

гдѣ l означаетъ теперь не длину катушки, а длину пути средней магнитной линіи въ сантиметрахъ.



Фиг. 62.

Если, теперь, $\boldsymbol{Q}$ поперечное сѣченіе желѣза въ квадрат. сант., измѣренное перпендикулярно къ направленію силовыхъ линій, то все число силовыхъ линій опредѣлится по уравненію:

$$\boldsymbol{N} = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{Q} = \frac{\mu \cdot 0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i \cdot \boldsymbol{Q}}{l}.$$

или, если положить $\xi \cdot i = X$, получаемъ:

$$N = \frac{X}{\frac{l}{0{,}4\,\pi \cdot \mu \cdot Q}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (33)$$

Знаменатель въ правой части по виду подобенъ выраженію для электрическаго сопротивленія:

$$w = \rho \cdot \frac{l}{q}.$$

Эта аналогія станетъ еще очевиднѣе, если замѣтимъ, что проводимость величина обратная сопротивленію, и если въ уравненіи (33) произведеніе $0{,}4\,\pi \cdot \mu$ станемъ разсматривать, какъ удѣльную проницаемость. Тогда величина $\frac{1}{0{,}4\,\pi \cdot \mu}$ соотвѣтствуетъ удѣльному сопротивленію ρ.

Поэтому выраженіе $\frac{l}{0{,}4\,\pi \cdot \mu \cdot Q}$ представляетъ собою сопротивленіе, притомъ магнитное сопротивленіе. Послѣднее прямо пропорціонально длинѣ и обратно пропорціонально проницаемости и поперечному сѣченію пути магнитныхъ линій.

Мы приходимъ, слѣдовательно, такимъ путемъ къ воззрѣнію, что силовыя линіи прогоняются сквозь магнитное сопротивленіе подобно тому, какъ электрическій токъ сквозь электрическое сопротивленіе. Чтобы показать это сходство яснѣе, говорятъ о магнитномъ потокѣ. Сила, которая гонитъ этотъ потокъ черезъ магнитную цѣпь, доставляется ампервитками X. Мы можемъ, такимъ образомъ, сравнить послѣднюю съ электродвижущей силой, которая прогоняетъ черезъ цѣпь электрическій токъ. Можетъ быть, это станетъ еще яснѣе, если обратимся къ выведенному изъ уравн. (31), стр. 88, равенству:

$$H \cdot l = 0{,}4\,\pi \cdot X.$$

Такъ какъ величина H представляетъ силу, дѣйствующую на полюсъ 1, то произведеніе $H \cdot l$ является работой, необходимой для перемѣщенія въ воздухѣ полюса 1 противъ силовыхъ линій вдоль пути l. Но вѣдь это то же самое, что въ статьѣ 22 мы принимали за разность потенціаловъ. Мы можемъ, слѣдовательно, величину X разсматривать, какъ магнитное давленіе или магнитное напряженіе. Подобно электродвижущей силѣ, назовемъ это напряженіе магнитодвижущей силой, и получимъ, такимъ образомъ, для закона, представленнаго уравн. (33), слѣдующее выраженіе:

$$\text{Магнитный потокъ} = \frac{\text{магнитодвижущей силѣ}}{\text{магнитное сопротивленіе}}.$$

Хотя этотъ законъ Ома для магнитной цѣпи и сталъ исходною точкою при расчетѣ динамомашинъ и двигателей, но все же нужно имѣть въ виду, что каждое сравненіе обыкновенно бываетъ не совсѣмъ точно, и что поэтому сопоставленія магнитныхъ и электрическихъ явленій нужно считать справедливыми только до извѣстной степени. Прежде всего общее число силовыхъ линій N называютъ магнитнымъ потокомъ, но это только одно названіе, которое дѣлаетъ болѣе удобнымъ сравненіе съ электрическимъ токомъ. На самомъ же дѣлѣ силовыя линіи не текутъ: разъ возникнувъ, онѣ остаются въ покоѣ.

Конечно, сомнительно также, имѣетъ ли за собою что-либо реальное и предположеніе о теченіи электричества, но оно удобно для объясненій электрическихъ явленій. Однако здѣсь имѣется и существенное различіе: при такъ называемомъ электрическомъ токѣ нужно затратить работу, чтобы дать возможность электричеству преодолѣть сопротивленіе проводника—работу, которая при этомъ превращается въ тепло Джоуля. Для поддержанія же магнитнаго тока, напротивъ, не требуется никакой затраты энергіи. Такъ, напримѣръ, энергія, расходуемая въ обмоткѣ электромагнитовъ динамо, вовсе не идетъ на поддержаніе магнитнаго состоянія, а превращается всецѣло въ тепло Джоуля, которое опредѣляется произведеніемъ $i_m{}^2 \cdot w_m$, если i_m будетъ токъ въ обмоткѣ электромагнитовъ, а w_m — ея сопротивленіе. Этотъ расходъ энергіи остался бы безъ перемѣны и въ томъ случаѣ, когда при той же силѣ тока внутри катушки вмѣсто желѣза находился бы воздухъ, т. е. когда существовало бы чрезвычайно малое число силовыхъ линій. Въ силу этого, когда, напримѣръ, часть силовыхъ линій динамомашины замкнется помимо якоря черезъ воздухъ, нельзя собственно считать, что произойдетъ потеря затрачиваемой энергіи.

Наконецъ, надо указать еще на то, что электрическое сопротивленіе зависитъ главнымъ образомъ отъ длины и поперечнаго сѣченія, тогда какъ магнитное, кромѣ того, зависитъ еще отъ степени насыщенія желѣза.

Примѣромъ примѣненія закона Ома для магнитной цѣпи можетъ послужить расчетъ динамомашинъ. Магнитная цѣпь состоитъ изъ отдѣльныхъ частей, которыя неодинаковы по длинѣ, поперечному сѣченію и матеріалу (воздухъ, кованое желѣзо, чугунъ). Кромѣ того, часть силовыхъ линій утекаетъ вслѣдствіе разсѣиванія, т. е. пробиваетъ себѣ побочный путь черезъ окружающій воздухъ, такъ что одна часть магнитной цѣпи проводитъ бо́льшее число силовыхъ линій, чѣмъ другая. Обыкновенно отыскиваютъ ампервитки, необходимые для того, чтобы прогнать силовыя линіи черезъ

всю магнитную цѣпь. Чтобы разрѣшить эту задачу, дѣлятъ число силовыхъ линій, проходящихъ черезъ извѣстную часть магнитной цѣпи, на площадь поперечнаго сѣченія послѣдней. Этимъ путемъ получаютъ магнитную индукцію въ этой части или величину магнитнаго потока на квадратный сантиметръ:

$$B_1 = \frac{N_1}{Q_1}.$$

Далѣе, отыскиваютъ на кривой намагничиванія для даннаго матеріала соотвѣтствующую величину H_1, т. е. число силовыхъ линій на квадратный сантиметръ, которое должно было бы находиться въ воздухѣ, чтобы произвести въ желѣзѣ индукцію B_1. Къ сожалѣнію, B и H не находятся въ простой зависимости другъ отъ друга, ибо, какъ мы уже видѣли, очень большое значеніе имѣетъ въ данномъ случаѣ степень насыщенія и вслѣдствіе этого приходится обращаться къ найденной опытнымъ путемъ кривой намагничиванія. Изъ H_1, теперь, на основаніи уравненія (31), стр. 88, получаемъ:

$$X_1 = 0{,}8\, H_1 \cdot l_1,$$

гдѣ l_1 длина пути силовыхъ линій въ разсматриваемой части магнитной цѣпи. Подобный расчетъ производятъ для всѣхъ частей магнитной цѣпи и тогда получаютъ:

$$\Sigma X = X_1 + X_2 + X_3 \cdots = 0{,}8 H_1 \cdot l_1 + 0{,}8 H_2 \cdot l_2 + 0{,}8 H_3 \cdot l_3 \ldots$$

Если на кривой намагничиванія нанесены непосредственно значенія $\frac{X}{l}$, т. е. по оси абсциссъ ампервитки на сантиметръ, то расчетъ для пути черезъ желѣзо упростится, въ то время, какъ для воздуха остается въ силѣ уравненіе:

$$X_l = 0{,}8\, B_l \cdot l_l = 0{,}8\, H_l \cdot l_l.$$

Тогда получаемъ:

$$\Sigma X = \left(\frac{X}{l}\right)_1 \cdot l_1 + \left(\frac{X}{l}\right)_2 \cdot l_2 \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . + 0{,}8 H_l \cdot l_l.$$

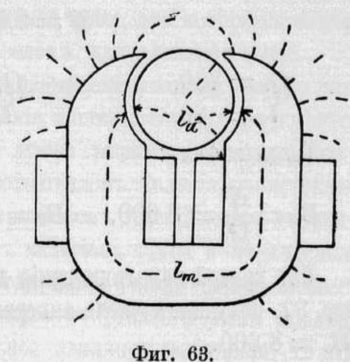
Пусть, напримѣръ, магнитный остовъ динамомашины характеризуется слѣдующими величинами:

Діаметръ якоря	$D = 20$	сант.
Діаметръ вала	$d_w = 3$	»
Длина якоря (вдоль оси)	$b = 20$	»
Длина пути силовыхъ линій въ якорѣ .	$l_a = 20$	»
Уголъ обхвата полюсомъ якоря . . .	$\beta = 120^\circ$	»

Разстояніе между поверхностями якоря и полюса		0,4 сант.
Поперечное сѣченіе сердечника электромагнитовъ и части, ихъ замыкающей	$Q_m = 400$	кв. сант.
Длина пути силовыхъ линій въ электромагнитахъ	$l_m = 110$	сант.

Пусть якорь составленъ изъ листовъ кованаго желѣза, изолированныхъ другъ отъ друга шелковой бумагой, и потеря объема на эту бумажную изоляцію будетъ 15%. Магнитный остовъ отлитъ изъ чугуна. Часть силовыхъ линій, возникшихъ въ электромагнитахъ, какъ указываетъ фиг. 63, разсѣивается. Положимъ, что магнитный потокъ въ сердечникахъ электромагнитовъ N_m на 20% больше магнитнаго потока въ якорѣ. Тогда имѣемъ:

$$N_m = 1{,}2 \cdot N.$$



Фиг. 63.

Надо найти число ампервитковъ, необходимое для существованія въ якорѣ числа силовыхъ линій $N = 2{,}5 \cdot 10^6$.

Для этого опредѣлимъ сперва поперечное сѣченіе и длину каждой отдѣльной части пути магнитнаго потока. Поперечное сѣченіе якоря, перпендикулярное къ направленію магнитнаго потока, мы получимъ, умножая разность $D - d_w$ на длину якоря b и кромѣ того, вслѣдствіе изоляціи, на 0,85. Тогда имѣемъ:

$$Q_a = b\,(D - d_w) \cdot 0{,}85 = 290 \text{ квадр. сант.}$$

$$l_a \text{ дано} = 20 \text{ сант.}$$

Поперечное сѣченіе междужелѣзнаго пространства Q_l получимъ, если боковую поверхность якоря уменьшимъ въ отношеніи $\beta : 360$. При этомъ понятно, что за поперечное сѣченіе междужелѣзнаго пространства надо принимать только поверхность одного полюса.

Такимъ образомъ, получаемъ:

$$Q_l = D \cdot \pi \cdot b \cdot \frac{\beta}{360} = 420 \text{ квадр. сант.}$$

Длину пути силовыхъ линій въ воздухѣ l_l получаемъ, умножая длину междужелѣзнаго пространства на 2, такъ какъ магнитный потокъ всякій

разъ при входѣ въ якорь и при выходѣ изъ него проходитъ черезъ воздушный промежутокъ. Такимъ образомъ имѣемъ:

$$\boldsymbol{l}_l = 2 \cdot 0{,}4 = 0{,}8 \text{ сант.}$$
$$\boldsymbol{Q}_m \text{ дано } = 400 \text{ квадр. сант.}$$
$$\boldsymbol{l}_m \quad \text{»} \quad = 110 \text{ сант.}$$

Далѣе еще имѣемъ:

$$\boldsymbol{N}_m = 1{,}2\, \boldsymbol{N} = 3.10^6.$$

Сопоставляя эти результаты, получаемъ:

$$\boldsymbol{N} = 2{,}5 \cdot 10^6 \qquad \boldsymbol{N}_m = 3 \cdot 10^6.$$

$$\boldsymbol{Q}_a = 290, \qquad \boldsymbol{Q}_l = 420, \qquad \boldsymbol{Q}_m = 400,$$
$$\boldsymbol{l}_a = 20, \qquad \boldsymbol{l}_l = 0{,}8 \qquad \boldsymbol{l}_m = 110.$$

Тогда имѣемъ:

$$\boldsymbol{B}_a = \frac{\boldsymbol{N}}{\boldsymbol{Q}_a} = 8\,600, \qquad \boldsymbol{B}_l = \frac{\boldsymbol{N}}{\boldsymbol{Q}_l} = 5\,960, \qquad \boldsymbol{B}_m = \frac{\boldsymbol{N}_m}{\boldsymbol{Q}_m} = 7\,500.$$

Изъ кривой намагничиванія для листового желѣза якоря на фиг. 61, стр. 92, получаемъ число ампервитковъ на сантиметръ пути для индукціи $\boldsymbol{B}_a = 8\,600$.

$$\left(\frac{X}{\boldsymbol{l}}\right)_a = 2.$$

Это представляетъ число ампервитковъ, необходимое для проведенія магнитнаго тока $\boldsymbol{B}_a$ сквозь желѣзо якоря на протяженіи одного сантиметра. Все число ампервитковъ, необходимое для якоря, составитъ, такимъ образомъ:

$$X_a = \left(\frac{X}{\boldsymbol{l}}\right)_a \cdot \boldsymbol{l}_a = 40.$$

Точно такимъ же образомъ изъ кривой намагничиванія для чугуна для индукціи $\boldsymbol{B}_m = 7\,500$ найдемъ величину:

$$\left(\frac{X}{\boldsymbol{l}}\right)_m = 40.$$

Отсюда число ампервитковъ X_m, необходимое для прохожденія магнитнаго потока $\boldsymbol{B}_m$ сквозь магнитный остовъ вдоль пути $\boldsymbol{l}_m = 110$ сант., будетъ:

$$X_m = \left(\frac{X}{\boldsymbol{l}}\right)_m \cdot \boldsymbol{l}_m = 40 \cdot 110 = 4\,400.$$

Наконецъ, ампервитки для междужелѣзнаго пространства X_l получаются изъ уравненія

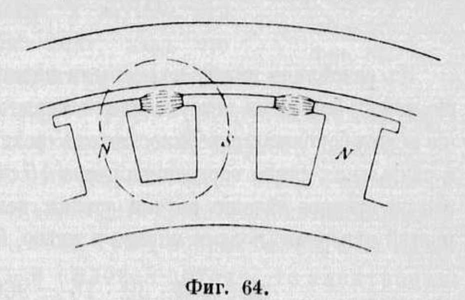
$$X_l = 0{,}8\, \boldsymbol{B}_l \cdot \boldsymbol{l}_l = 3\,820.$$

Тогда имѣемъ:

$$\Sigma X = X_a + X_m + X_l = 8\,260.$$

При этомъ безразлично, находится ли, напримѣръ, на сердечникѣ электромагнита 8 260 витковъ въ 1 амперъ или 4 130 въ 2 ампера, предполагая, что коэффиціентъ полезнаго дѣйствія машины пока не принимается во вниманіе. Впрочемъ, во многихъ случаяхъ зубцы якоря или сердечники полюсовъ образуютъ особыя части магнитной цѣпи, для которыхъ ампервитки разсчитываются подобнымъ же образомъ, какъ указано выше.

Другимъ примѣромъ примѣненія такъ называемаго закона Ома для магнитной цѣпи является опредѣленіе разсѣянія машины. Этотъ расчетъ здѣсь приводится собственно для того, чтобы лучше уяснить, что ампервитки должны разсматриваться, какъ разность потенціаловъ. Явленія, проистекающія здѣсь, сходны съ явленіями при электрическомъ токѣ. Въ цѣпь съ опредѣленнымъ электрическимъ напряженіемъ включена лампа и параллельно къ ней присоединено сопротивленіе; тогда часть полнаго тока пойдетъ черезъ лампу, а часть черезъ параллельное отвѣтвленіе. Если послѣднее имѣетъ болѣе или менѣе значительное земляное соединеніе, то эта часть тока пропадаетъ для полезной работы. Подобнымъ же образомъ на полюсныхъ надставкахъ машины существуетъ магнитное давленіе, которое съ одной стороны прогоняетъ магнитный потокъ черезъ якорь, а съ другой стороны заставляетъ силовые линіи разсѣиваться въ воздухъ. Это магнитное давленіе опредѣляется изъ ампервитковъ $X_a + X_z + X_l$, которые необходимы для проведенія магнитнаго потока черезъ якорь, зубцы и междужелѣзное пространство.



Фиг. 64.

Въ начерченной на фиг. 64 многополюсной машинѣ перемѣннаго тока пусть сумма $X_a + X_z + X_l = 6\,200$. Это магнитное давленіе въ то же время преодолѣваетъ сопротивленіе разсѣяннаго потока между полюсными надставками (потока утечки). Длина якоря по направленію оси пусть равняется 30 сант. Ширина полюсной надставки по радіальному направленію пусть 2,5 сант. и разстояніе между надставками $\boldsymbol{l}_{s_1} = 6{,}5$ сант. Попереч-

ное сѣченіе разсѣяннаго потока между однимъ сѣвернымъ полюсомъ и однимъ южнымъ полюсомъ будетъ тогда $30 \cdot 2{,}5 = 75$ кв. сант. Но такъ какъ силовыя линіи, исходящія изъ сѣвернаго полюса, идутъ направо и налѣво къ южному полюсу, то все поперечное сѣченіе разсѣяннаго потока пока надо принять равнымъ $2 \cdot 75 = 150$ квадр. сант. Предположимъ, что поперечное сѣченіе соотвѣтственно расположенію силовыхъ линій, представленному на фиг. 64, посрединѣ будетъ вдвое больше; тогда среднее поперечное сѣченіе разсѣяннаго потока между полюсными надставками будетъ:

$$Q_{s_1} = \frac{150 + 300}{2} = 225 \text{ квадр. сант.}$$

Подставимъ теперь величины $Q_{s_1} = 225$ и $l_{s_1} = 6{,}5$ въ уравн. (33), стр. 94, и, принявъ во вниманіе, что проницаемость μ воздуха равняется 1, получимъ потокъ утечки N_{s_1} между полюсными надставками равнымъ:

$$N_{s_1} = \frac{6\,200}{\frac{6{,}5}{0{,}4\,\pi \cdot 1 \cdot 225}} = 0{,}27 \cdot 10^6 \text{ силовыхъ линій.}$$

Такой же результатъ получаемъ изъ основного уравненія:

$$H = \frac{0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i}{l}.$$

Къ разсѣянію между полюсными надставками присоединяется разсѣяніе между боковыми поверхностями сердечника электромагнита. Разстояніе между боковыми поверхностями въ среднемъ пусть будетъ $l_{s_2} = 10$ сант., а радіальная длина сердечника равна 16 сант. При длинѣ якоря въ 30 сант. все поперечное сѣченіе потока утечки, исходящаго изъ боковыхъ поверхностей сѣвернаго полюса вправо и влѣво, будетъ тогда:

$$Q_{s_2} = 2 \cdot 30 \cdot 16 = 960 \text{ квадр. сант.}$$

Магнитное давленіе при этомъ на полюсныхъ надставкахъ равняется 6 200, а на ободѣ машины 0. Слѣдовательно, мы можемъ для магнитнаго давленія X взять среднее значеніе, равное 3 100, и получимъ потокъ утечки между боковыми поверхностями:

$$N_{s_2} = \frac{X}{\frac{l_{s_2}}{0{,}4\pi \cdot Q_{s_2}}} = \frac{3\,100}{\frac{10}{0{,}4\,\pi \cdot 960}} = 0{,}37 \cdot 10^6$$

Общій потокъ утечки равняется, такимъ образомъ:

$$N_s = N_{s_1} + N_{s_2} = 0{,}27 \cdot 10^6 + 0{,}37 \cdot 10^6 = 0{,}64 \cdot 10^6.$$

Предположимъ теперь, что полезный магнитный потокъ N, проходящій через якорь, составляетъ $3 \cdot 10^6$, тогда потокъ, проходящій сквозь ободъ, будетъ:

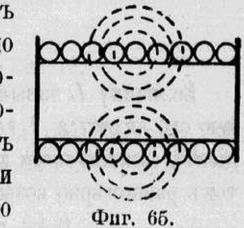
$$N_m = N + N_s = 3{,}64 \cdot 10^6$$

и коэффиціентъ разсѣянія или утечки составитъ:

$$\sigma = \frac{N_m}{N} = \frac{3{,}64 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6} = 1{,}2.$$

32. Самоиндукція.

Индуктируемая электродвижущая сила появляется всякій разъ, когда силовой потокъ, пересѣкающій плоскость витка, измѣняется. Это явленіе происходитъ также и въ томъ случаѣ, когда токъ, создающій силовыя линіи, увеличивается или уменьшается. Такой процессъ называютъ самоиндукціей. Мы можемъ, согласно фиг. 65, представить себѣ, что силовыя линіи, которыя создаются, напримѣръ, въ самомъ началѣ появленія тока, окружаютъ проводникъ сначала въ видѣ круговъ небольшого діаметра, а затѣмъ эти послѣдніе разрастаются подобно тому, какъ это имѣетъ мѣсто въ водѣ при брошенномъ въ нее камнѣ. При этомъ силовыя линіи пересѣкаютъ рядомъ расположенные витки[1]). На фиг. 65 это представлено для силовыхъ линіи среднихъ витковъ.


Фиг. 65.

Индуктируемая электродвижущая сила, согласно ст. 26, имѣетъ такое направленіе, что создаетъ токъ, который препятствуетъ измѣненію силового потока. Такимъ образомъ, если токъ возрастаетъ, а за нимъ, слѣдовательно, возрастаетъ и силовой потокъ, то электродвижущая сила самоиндукціи направлена противъ тока; но она будетъ одного направленія съ убывающимъ токомъ.

Предположимъ теперь, что силовой потокъ, создаваемый ξ витками, проходитъ черезъ всѣ ξ витковъ, и что магнитная проницаемость μ желѣзнаго сердечника, находящагося внутри катушки, будетъ постоянна. Если

[1]) Въ принципѣ здѣсь достаточно было бы принять во вниманіе только измѣненіе силового потока, проходящаго черезъ катушку. Но мы удерживаемъ ради наглядности представленіе о пересѣченіи силовыми линіями отдѣльныхъ витковъ.

токъ i возрастаетъ на величину di, то число вновь возникшихъ силовыхъ линій, согласно стр. 93, будетъ

$$dN = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{\xi \cdot di}{l} \cdot \mu \cdot Q\,.$$

Электродвижущая сила самоиндукціи, согласно общему закону индукціи, тогда равна:

$$E_s = -\xi \cdot \frac{dN}{dt} \cdot 10^{-8}.$$

Подставимъ это выраженіе въ вышенайденное значеніе dN и кромѣ того положимъ

$$L = 4\pi \cdot \frac{\xi^2 \cdot \mu \cdot Q}{l} \cdot 10^{-9}, \quad \ldots\ldots\ldots (34)$$

тогда

$$E_s = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (35)$$

Величину L называютъ коэффиціентомъ самоиндукціи. Единицею его является 1 генри. Эта единица представляетъ собою коэффиціентъ самоиндукціи катушки, въ которой индуктируется 1 вольтъ, когда токъ равномѣрно возрастаетъ на 1 амперъ въ 1 секунду.

Выраженіе $\frac{0{,}4\pi \cdot \xi \cdot \mu \cdot Q}{l}$ будетъ силовой потокъ, создаваемый 1 амперомъ. Если мы умножимъ его на ξ, тогда получимъ силовой потокъ, который проходитъ плоскость витковъ всей катушки при силѣ тока въ одинъ амперъ. Подъ плоскостью витковъ всей катушки слѣдуетъ понимать произведеніе изъ числа витковъ на поперечное сѣченіе катушки. Отсюда, согласно уравненію (34), получаемъ: коэффиціентъ самоиндукціи въ генри является произведеніемъ суммы силовыхъ линій, проходящихъ всѣ витки и создаваемыхъ токомъ въ 1 амперъ, на множитель 10^{-8}. Съ другой стороны, выраженіе $\frac{0{,}4\pi \cdot \mu \cdot Q}{l}$ представляетъ собою силовой потокъ, порождаемый однимъ ампервиткомъ. Такимъ образомъ, для того, чтобы опредѣлить коэффиціентъ самоиндукціи L, можно также силовой потокъ, порождаемый однимъ амперниткомъ, умножить на квадратъ числа витковъ и на 10^{-8}. Согласно опытнымъ даннымъ, на каждый проводникъ, напримѣръ уложенный въ желѣзѣ въ открытомъ каналѣ, и на каждый амперъ

и сантиметръ длины проводника приходится около 6 силовыхъ линій. Пусть, напримѣръ:

длина якоря динамомашины . . .	$b = 30$ см.
число витковъ въ катушкѣ	$\xi = 2$.
сила тока	$i = 50$ амп.
время коммутированія	$T = 0{,}004$ сек.

Положимъ, далѣе, что токъ отъ $+50$ амперъ долженъ коммутироваться на -50 амперъ. Такъ какъ самый витокъ состоитъ изъ двухъ проводниковъ длиною b, уложенныхъ въ желѣзѣ, и двухъ соединеній, имѣющихся на лобовыхъ частяхъ якоря, вліяніемъ которыхъ можно пренебречь, то число силовыхъ линій, создаваемыхъ однимъ амперниткомъ, будетъ $6 \cdot 2b = 360$. Тогда

$$L = 360 \cdot \xi^2 \cdot 10^{-8} = 1\,440 \cdot 10^{-8}.$$

Такъ какъ токъ въ 50 амперъ во время T долженъ измѣниться (коммутироваться) отъ $+i$ на $-i$, то средняя самоиндукція будетъ:

$$E_{s\ \text{среднее}} = L\frac{di}{dt} = L \cdot \frac{2i}{T} = 0{,}36 \text{ вольта}.$$

Вліяніе самоиндукціи сказывается при замыканіи тока въ томъ, что токъ, только постепенно возрастая, доходитъ до своей полной силы, при ослабленіи тока самоиндукція замедляетъ паденіе его.

При мгновенномъ размыканіи цѣпи обмотки электромагнитовъ самоиндукція достигаетъ значительной величины. Въ этомъ случаѣ очень большое число силовыхъ линій, проходящихъ черезъ желѣзо, мгновенно сокращается и пересѣкается значительнымъ числомъ витковъ обмотки электромагнитовъ. Въ основномъ уравненіи (27), стр. 78:

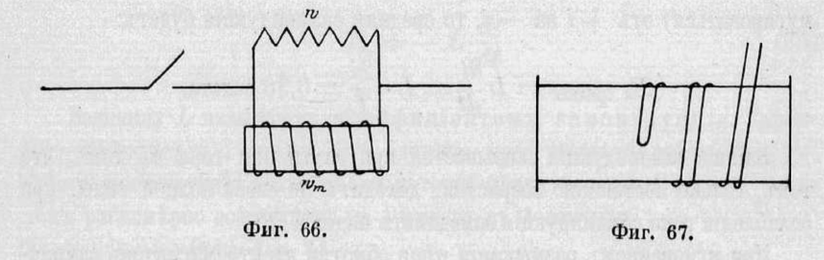
$$E = -\xi \cdot \frac{dN}{dt} \cdot 10^{-8}$$

каждый отдѣльный множитель представляетъ собою значительную величину, и электродвижущая сила при этомъ можетъ возрасти настолько, что пробьетъ изоляцію. Во всякомъ случаѣ въ мѣстѣ перерыва цѣпи получается сильная искра, такъ какъ самоиндукція стремится замкнуть токъ черезъ воздухъ.

Поэтому въ машинахъ или электродвигателяхъ токъ передъ размыканіемъ его въ обмоткѣ электромагнитовъ предварительно ослабляютъ при посредствѣ добавочнаго сопротивленія w, включаемаго или послѣдовательно

или параллельно съ обмоткою w_m электромагнита (фиг. 66). Если, теперь, разомкнуть главный токъ, то токъ и силовой потокъ въ электромагнитахъ не исчезаютъ мгновенно, такъ какъ пропадающія силовыя линіи индуктируютъ въ обмоткѣ электромагнита электродвижущую силу самоиндукціи, которая будетъ одного направленія съ убывающимъ токомъ. Послѣдняя въ теченіе нѣкотораго времени гонитъ токъ черезъ обмотку и сопротивленіе w, и катушка, такимъ образомъ, утрачиваетъ токъ не мгновенно, а постепенно (см. ст. 65).

Въ нѣкоторыхъ случаяхъ необходимо бываетъ совершенно устранить самоиндукцію прибора. Такъ, напримѣръ, существуетъ одинъ видъ мостика Уитстона, гдѣ источникомъ тока является вторичная катушка индукціоннаго прибора, а въ качествѣ измѣрительнаго аппарата включаютъ въ одну изъ вѣтвей мостика телефонъ. Въ этомъ случаѣ симоиндукція въ опредѣляемомъ сопротивленіи мѣшала бы измѣренію, такъ какъ проходящій черезъ сопротивленіе токъ зависѣлъ бы не только отъ омическаго сопроти-



Фиг. 66. Фиг. 67.

вленія, но и отъ самоиндукціи, которая по временамъ то усиливала бы, то ослабляла бы его. Поэтому этимъ способомъ является возможнымъ измѣрять только безъиндукціонныя сопротивленія, напримѣръ лампочки накаливанія или прямолинейные проводники. Понятно, эталонныя сопротивленія должны быть также безъиндукціонными. Это достигается тѣмъ, что наматываемую проволоку сгибаютъ вдвое и въ такомъ видѣ навиваютъ ее (бифилярная обмотка), фиг. 67. При этомъ способѣ магнитное дѣйствіе одного витка уравновѣшивается дѣйствіемъ сосѣдняго витка.

Теперь опредѣлимъ характеръ измѣненія силы тока въ зависимости отъ времени при возрастаніи и убываніи его.

Катушка съ сопротивленіемъ w и съ коэффиціентомъ самоиндукціи L включена въ постоянное напряженіе E. Тогда конечное значеніе силы тока J, равное $\frac{E}{w}$, достигается постепенно, такъ какъ самоиндукція замедляетъ возрастаніе тока. Пусть i будетъ мгновеннымъ значеніемъ силы тока

ко времени t и di увеличеніе силы тока за время dt. Тогда второй законъ Кирхгофа намъ дастъ:

$$E - L \cdot \frac{di}{dt} = i \cdot w.$$

Отрицательный знакъ въ лѣвой части поставленъ потому, что самоиндукція противодѣйствуетъ возрастающему току. Перепишемъ предыдущее уравненіе иначе:

$$\frac{w}{L} \cdot dt = \frac{di}{\frac{E}{w} - i} = \frac{di}{J - i}$$

Интегрируя данное уравненіе и выражая постоянную интегрированія черезъ lnC, получаемъ

$$-\frac{w}{L} \cdot t = ln\,(J - i) + lnC = ln\,[C(J - i)],$$

т. е. если мы основаніе натуральныхъ логариѳмовъ 2,71828 обозначимъ черезъ ε, тогда

$$\varepsilon^{-w \cdot \frac{t}{L}} = C(J - i).$$

Для опредѣленія постоянной интегрированія замѣтимъ, что при $t = 0$ i также равно 0. Если мы оба эти значенія подставимъ въ вышеприведенное уравненіе, то получимъ

$$C = \frac{1}{J}.$$

Согласно этому, уравненіе кривой, изображающей зависимость измѣненія силы тока отъ времени, будетъ

$$\varepsilon^{-w \cdot \frac{t}{L}} = 1 - \frac{i}{J}$$

или

$$i = J - J\varepsilon^{-\frac{w}{L} \cdot t}.$$

Если мы отложимъ время t по оси абсциссъ, а силу тока i по оси ординатъ, то получимъ кривую фиг. 67а. Для $t = \frac{L}{w}$ будетъ $i = J - \frac{J}{\xi} = 0{,}63 \cdot J$. Величина $\frac{L}{w}$ представляетъ собою время, въ теченіе котораго

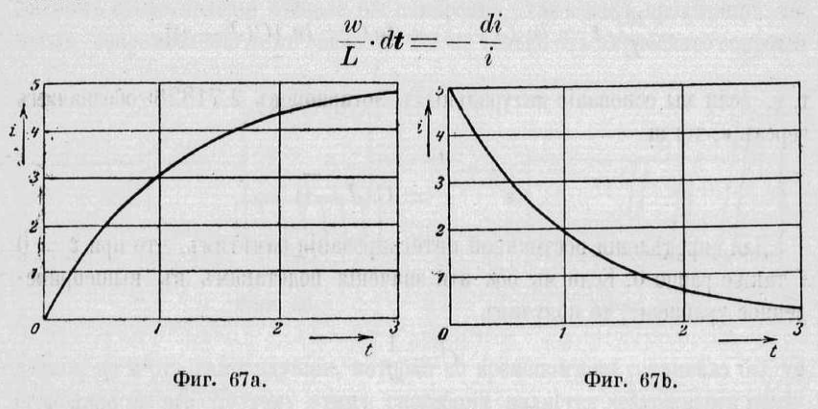
токъ достигнетъ 0,63 своего конечнаго значенія. Поэтому величину $\frac{L}{w}$ называютъ постоянной времени.

Опредѣлимъ теперь кривую, когда токъ будетъ измѣняться отъ значенія J до 0. При этомъ мы примемъ сопротивленіе w постояннымъ. Ослабленіе силы тока произойдетъ потому, что электродвижущая сила будетъ равна нулю. Тогда будетъ имѣть мѣсто слѣдующее уравненіе:

$$-L\cdot\frac{di}{dt}=i\cdot w.$$

Такъ какъ въ этомъ случаѣ di отрицательно, то лѣвая часть будетъ положительна, т. е. электродвижущая сила самоиндукціи будетъ одного направленія съ убывающимъ токомъ. Подобно тому, какъ выше, мы получаемъ

$$\frac{w}{L}\cdot dt=-\frac{di}{i}$$



Фиг. 67a. Фиг. 67b.

или, интегрируя, получимъ

$$-\frac{w}{L}\cdot t=ln\,i+ln\,C=ln\,(C\cdot i),$$

т. е.

$$\varepsilon^{-\frac{w}{L}\cdot t}=C\cdot i.$$

Для $t=0$ будетъ $i=J$, т. е.

$$C=\frac{1}{J}.$$

Согласно этому уравненіе кривой тока при убываніи его будетъ

$$i=J\cdot\varepsilon^{-\frac{w}{L}\cdot t}$$

Если отложимъ, теперь, время t по оси абсциссъ, а силу тока i по оси ординатъ, то получимъ кривую фиг. 67b. Для $t=\frac{L}{w}$ будетъ $i=\frac{J}{\varepsilon}=0,37J$. Такимъ образомъ, постоянная времени $\frac{L}{w}$ указываетъ, когда токъ упадаетъ до 0,37 своего начальнаго значенія. Кривыя фиг. 67a и 67b, если одну изъ нихъ повернуть на 180°, представятъ взаимныя зеркальныя изображенія. Кривыя вычерчены для $J=5$ и $\frac{L}{w}=1$.

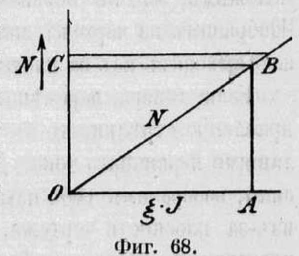
Намъ еще необходимо разсмотрѣть самый процессъ работы, которымъ сопровождается возникновеніе и исчезновеніе силового потока. Когда возрастаетъ токъ катушки, то, согласно стр. 101, индуктируется электродвижущая сила самоиндукціи E, которая противодѣйствуетъ току. Когда эта электродвижущая сила преодолѣваетъ напряженіе у зажимовъ, то она производитъ электрическую работу:

$$dA=E\cdot J\cdot dt.$$

Эта работа накопляется въ видѣ магнитной энергіи (потенціальной энергіи) и при разрывѣ тока снова переходитъ въ теплоту (образованіе искры). Общее уравненіе для электрической работы

$$dA=E\cdot J\cdot dt=-\xi\cdot dN\cdot J$$

пригодно также и для работы при возникновеніи и исчезновеніи магнитнаго потока. При возростаніи магнитнаго потока величины dN и J имѣютъ одинаковые знаки, а электрическая работа катушки отрицательный знакъ. Слѣдовательно, электрическая работа будетъ сообщаться. При уменьшеніи магнитнаго потока dN будетъ отрицательно, знакъ его будетъ противоположенъ знаку тока J, и электрическая работа будетъ положительна. При этомъ электрическая работа будетъ доставляться катушкою за счетъ расхода потенціальной энергіи. Потенціальная энергія, накопленная за время возрастанія тока отъ нуля до величины J, будетъ



Фиг. 68.

$$A=\int\xi\cdot dN\cdot J.$$

Если мы примемъ, что магнитная проницаемость постоянна, то произведеніе $\xi\cdot dN\cdot J$ представитъ полоску на фиг. 68. Сумма всѣхъ такихъ

полосокъ составитъ треугольникъ OCB, и будетъ равна $\frac{\xi \cdot J \cdot N}{2}$. Далѣе, согласно стр. 93 и стр. 102, мы имѣемъ:

$$N = \frac{4\pi \cdot \xi \cdot J \cdot \mu \cdot Q}{l},$$

и подставимъ

$$L = \frac{4\pi \cdot \xi^2 \cdot \mu \cdot Q}{l},$$

гдѣ L будетъ коэффиціентъ самоиндукціи въ абсолютныхъ единицахъ. Тогда накопленная магнитная энергія будетъ

$$A = \frac{\xi \cdot J \cdot N}{2} = \frac{L \cdot J^2}{2} \text{ эрговъ.}$$

Выразимъ теперь работу въ джоуляхъ, силу тока въ амперахъ и коэффиціентъ самоиндукціи въ генри.

1 эргъ $= 10^{-7}$ джоуля.

1 абсолютная единица силы тока $= 10$ амп.

1 абсолютная единица коэффиціента самоиндукціи $= 10^{-9}$ генри.

Тогда работа въ джоуляхъ выразится

$$A = \frac{L \cdot i^2}{2}.$$

33. Законы взаимной индукціи.

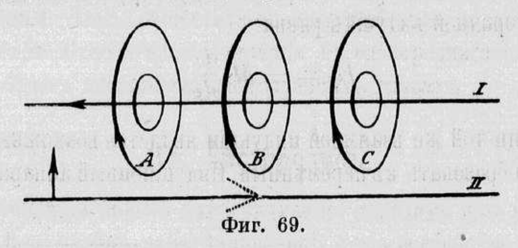
Теперь разсмотримъ явленія, происходящія при пересѣченіи проводникомъ силовыхъ линій другого проводника съ токомъ (фиг. 69). Положимъ, что въ первичномъ проводникѣ I токъ идетъ справа налѣво. Изобразимъ на чертежѣ силовыя линіи по правилу Ампера; онѣ въ A, B и C выходятъ изъ-за плоскости чертежа.

Если, теперь, перемѣщать вторичный проводникъ II снизу вверхъ по направленію стрѣлки, то въ точкахъ A, B и C онъ пересѣчется силовыми линіями первичнаго тока. Для опредѣленія направленія электродвижущей силы, вообразимъ себя плывущими по направленію силовыхъ линій, т. е. изъ-за плоскости чертежа, и будемъ смотрѣть по направленію движенія проводника, т. е. вверхъ. Тогда электродвижущая сила направляется вправо, т. е. по направленію, указываемому пунктирной стрѣлкой на проводникѣ II.

Отсюда получаемъ слѣдующее правило:

При сближеніи обоихъ проводниковъ индуктированный вторичный токъ будетъ направленія противоположнаго первичному. При удаленіи обоихъ проводниковъ вторичный токъ будетъ направленія одинаковаго съ первичнымъ.

Въ этомъ случаѣ мы снова можемъ провѣрить полученный нами результатъ при помощи закона сохраненія энергіи или закона Ленца, который, впрочемъ, является частнымъ случаемъ перваго болѣе общаго закона. Если соединить снаружи концы вторичнаго провода II проводникомъ, то получимъ токъ направленія, противоположнаго первичному току. По правилу же ст. 25 динамическаго взаимодѣйствія параллельныхъ токовъ, проводники I и II будутъ взаимно отталкиваться и противодѣйствовать перемѣщенію. Затраченная работа при перемѣщеніи переходитъ во вторичномъ проводникѣ въ тепло Джоуля.



Фиг. 69.

Для возбужденія электродвижущей силы вовсе не нужно сближать механически оба проводника,—для этого достаточно только усиленіе или ослабленіе первичнаго тока, такъ какъ силовыя линіи послѣдняго и въ этомъ случаѣ будутъ пересѣкать вторичный проводникъ (взаимная индукція).

Этотъ законъ «индукціи во время покоя» легко можно вывести, снова исходя изъ увеличенія и уменьшенія магнитнаго потока, создаваемаго первичной катушкой и пересѣкающаго вторичную катушку. Но къ подобнымъ же результатамъ мы придемъ, если будемъ разсматривать только пересѣченіе силовыхъ линій. Согласно уже сказанному на стр. 101 положенію, силовыя линія, создаваемыя токомъ, возникаютъ, выходя изъ проводника, какъ указано на фиг. 70a; затѣмъ постепенно разрастаются до тѣхъ поръ, пока не пересѣкутъ, направляясь сверху внизъ, вторичный проводникъ, фиг. 70b, т. е. какъ будто вторичный проводникъ перемѣщается кверху, и оба проводника сближаются.

Поэтому индуктированная электродвижущая сила, подобно самоиндукціи въ первичномъ проводникѣ, прямо противоположна по направленію возрастающему первичному току, и будетъ одного направленія съ убывающимъ первичнымъ токомъ.

Въ основныхъ своихъ чертахъ процессъ взаимной индукціи отличается немного отъ процесса самоиндукціи. Въ уравненіи (34) на стр. 102 вмѣсто ξ^2 въ данномъ случаѣ необходимо подставить произведеніе $\xi_1 \cdot \xi_2$, гдѣ ξ_1 обозначаетъ число первичныхъ витковъ, создающихъ силовыя линіи, и ξ_2—число вторичныхъ витковъ, пересѣкаемыхъ силовыми линіями. Тогда коэффиціентъ M взаимной индукціи, соотвѣтственно уравненію (34) стр. 102, будетъ

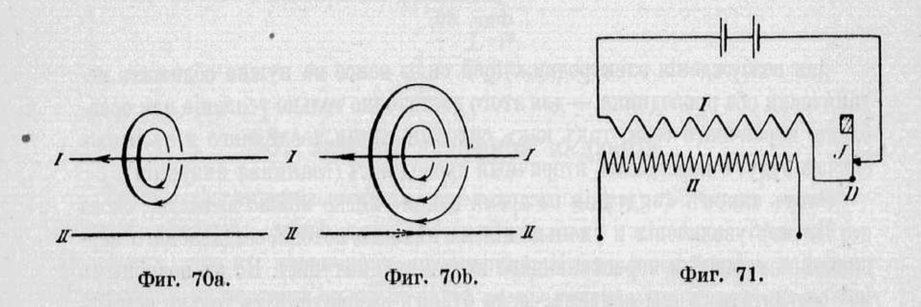
$$M = \frac{4\pi \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \mu \cdot Q}{l} \cdot 10^{-9}.$$

Подобно тому какъ въ ст. 32, коэффиціентъ взаимной индукціи будетъ также 10^{-8}-кратной силовыхъ линій, пересѣкающихъ катушку, когда по другой катушкѣ проходитъ токъ съ силою 1 амперъ.

Если первичный токъ равенъ i_1, то индуктируемая электродвижущая сила E_2 во вторичной катушкѣ равна:

$$E_2 = -M \cdot \frac{di}{dt}.$$

При помощи той же взаимной индукціи является возможнымъ постоянный токъ преобразовать въ перемѣнный. Индукціонный аппаратъ (фиг. 71)



Фиг. 70a. Фиг. 70b. Фиг. 71.

состоитъ изъ первичной катушки I, по которой идетъ постоянный токъ. Одинъ конецъ послѣдней присоединенъ къ источнику тока, а другой соединяется съ центромъ вращенія D пружины J. Черезъ контактное остріе пружина соединяется металлически съ источникомъ тока. Всякій разъ, когда токъ замыкается, катушка становится магнитомъ и притягиваетъ укрѣпленный на пружинкѣ кусочекъ желѣза, а вмѣстѣ съ нимъ и всю пружину. Благодаря этому токъ прерывается, катушка размагничивается, пружинящаяся пластинка отскакиваетъ и снова замыкаетъ токъ. Такимъ образомъ, мы получаемъ въ первичной катушкѣ прерывистый токъ, т. е. прерываемый постоянный токъ. Первичная катушка помѣщается внутри вторич-

ной, которая ради ясности начерчена на фиг. 71 рядомъ съ первичной. Силовыя линіи первичной катушки, появляясь и пропадая, то проникаютъ во внутрь вторичной катушки, то исчезаютъ тамъ. Онѣ, такимъ образомъ, пересѣкаютъ вторичную обмотку то въ одномъ, то въ другомъ направленіи, и поэтому индуктируютъ электродвижущую силу перемѣннаго направленія. Если соединить, теперь, зажимы вторичной катушки проводникомъ, то во вторичной цѣпи появятся перемѣнные токи. Послѣдніе возрастаютъ отъ нуля до нѣкотораго максимума, затѣмъ убываютъ и, дойдя снова до нуля, измѣняютъ свое направленіе. Слѣдовательно, они постоянно измѣняются по своей силѣ, а по временамъ и по направленію. Увеличивая далѣе число витковъ первичной катушки и прерывая, сколь это возможно, мгновенно первичный токъ, можно электродвижущую силу вторичной катушки заставить возрости до такихъ размѣровъ, что она пробьетъ воздушный слой значительной толщины. Такъ существуютъ индукціонныя катушки, дающія искру въ 1 метръ. Относительно индукціи въ электродвигателяхъ и трансформаторахъ будетъ сказано въ послѣдующихъ главахъ.

34. Гистерезисъ.

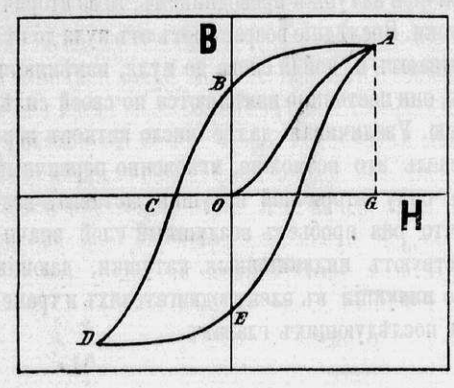
При вычерчиваніи кривой намагничиванія исходятъ изъ нейтральнаго состоянія желѣза; затѣмъ намагничивающій токъ постепенно усиливаютъ, вслѣдствіе чего одновременно возрастаютъ какъ величина намагничивающей силы H, такъ и индукціи B. Если откладывать намагничивающую силу $H = \frac{0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i}{l}$ по оси асбциссъ, а индукцію B по оси ординатъ, то получаемъ кривую OA, фиг. 72.

Станемъ, теперь, по достиженіи произвольной индукціи $AG = B_{max}$ уменьшать намагничивающій токъ; тогда при однѣхъ и тѣхъ же намагничивающихъ силахъ индукція въ этомъ случаѣ будетъ больше, чѣмъ въ предыдущемъ случаѣ при возростаніи намагничиванія. Отложимъ опять намагничивающія силы по оси абсциссъ, а соотвѣтствующія имъ индукціи по оси ординатъ; тогда получимъ кривую AB. Такимъ образомъ, отъ сильнаго предыдущаго намагничиванія какъ будто остается остатокъ магнетизма; это явленіе поэтому называютъ гистерезисомъ, т. е. явленіемъ запаздыванія.

Для намагничивающей силы $H = 0$ индукція равна OB. Послѣдняя представляетъ число силовыхъ линій на квадр. сантиметръ отъ остаточнаго магнетизма. Гистерезисъ и остаточный магнетизмъ представляютъ собою до извѣстной степени явленія одинаковаго порядка. Объясняютъ ихъ

тѣмъ, что частицы желѣза, разъ принявъ уже извѣстное положеніе, сопротивляются, какъ бы вслѣдствіе механическаго тренія, измѣненію послѣдняго.

Если направленіе тока перемѣнить, то для уничтоженія остаточнаго магнетизма потребуется намагничивающая сила извѣстной величины. Силу эту, представленную на фиг. 72 отрѣзкомъ OC, называютъ понудительной или коэрцитивной. Такимъ образомъ, мы видимъ, что молекулы желѣза противятся перемагничиванію. Когда намагничивающая сила переходитъ за величину OC, получаемъ индукцію обратнаго знака. Кривая CD въ этомъ случаѣ снова соотвѣтствуетъ возрастающему, а кривая DE убывающему намагничиванію. Ордината OE снова является остаточнымъ магнетизмомъ и т. д.



Фиг. 72.

Для упомянутой уже раньше мягкой стали (Грузона) опыты, произведенные надъ ней въ Германской Палатѣ Мѣръ и Вѣсовъ (Reichsanstalt), дали, напримѣръ, слѣдующіе результаты:

Убывающая индукція.		Возрастающая индукція.	
H	B	H	B
145,3	18 250	— 2,2	— 6 240
62,7	16 800	— 5,9	— 11 060
24,2	15 590	— 11,9	— 13 460
3,2	13 080	— 34,2	— 15 710
0	10 200	— 61,6	— 16 680
— 1,25	6 110	— 145,3	— 18 250
— 1,5	0		

Изъ этой таблицы мы видимъ, что остаточный магнетизмъ $B = 10\,200$, а понудительная сила $= 1{,}5$. Обѣ эти величины зависятъ отъ произвольно выбраннаго значенія B_{max}, хотя особенно значительной разницы не будетъ, если намагничиваніе довести вообще до сильнаго насыщенія.

Нанесемъ, теперь, величины вышеуказанной таблицы по координатной системѣ, на ординатахъ отложимъ B, а на абсциссахъ H; тогда площадь, заключенная между двумя вѣтвями кривой, будетъ равна 170 000.

Можно доказать, что эта площадь находится въ опредѣленномъ соотношеніи съ энергіей, израсходованной за полный циклъ на треніе молекулъ желѣза.

Согласно ст. 32, электрическая работа, произведенная катушкой при намагничиваніи въ первый разъ, равна $dA = -\xi \cdot J \cdot dN$, расходуемая же работа катушки будетъ знака противоположнаго. Тогда

$$dA = \xi \cdot J \cdot dN \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (a)$$

Если B будетъ означать число силовыхъ линій на квадратный сантиметръ, то имѣемъ

$$dN = dB \cdot Q.$$

Далѣе

$$\xi \cdot J = \frac{H \cdot l}{4\pi}.$$

Раздѣлимъ теперь обѣ части уравненія (a) на объемъ $Q \cdot l$ въ квадратныхъ сант. Тогда затраченная работа на 1 куб. см, сообщаемая въ видѣ электрической энергіи и преобразующаяся въ потенціальную энергію, будетъ:

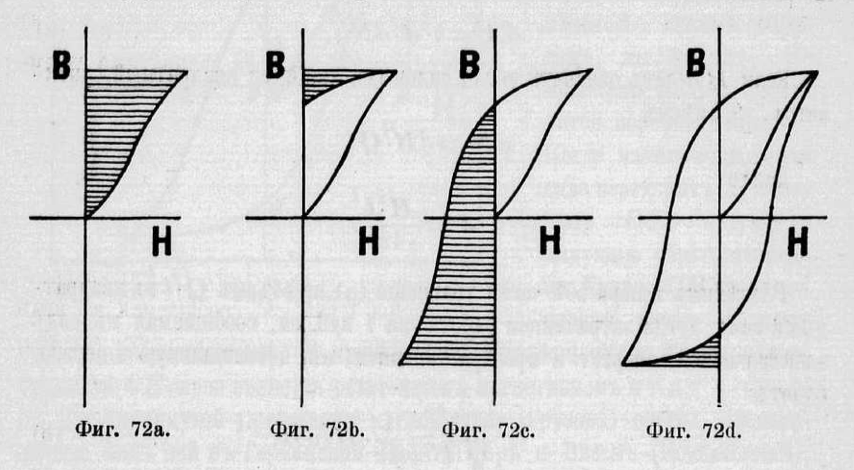
$$\frac{dA}{Q \cdot l} = \frac{1}{4\pi} \cdot H \cdot dB \quad \ldots\ldots\ldots \quad (b)$$

$H \cdot dB$ представляетъ узкую полоску площади на фиг. 72a, тогда $\int H \cdot dB$ представитъ всю заштрихованную площадь на этой фигурѣ. Раздѣливъ эту заштрихованную площадь на 4π, мы получаемъ затраченную работу въ эргахъ на 1 куб. см.

Если, теперь число силовыхъ линій станетъ убывать, то dN, а потому и работа будетъ также отрицательной, и мы получаемъ обратно часть израсходованной работы. Послѣдняя выражается площадью, заштрихованной на фиг. 72b. Если токъ перемѣнить свое направленіе, то накапливаемая работа снова будетъ положительна и выразится площадью, заштрихованною на фиг. 72c. Часть этой работы, выражающуюся площадью, заштрихованною на фиг. 72d, мы получимъ обратно.

Такимъ образомъ, затраченная на перемагничиваніе работа въ абсолютныхъ единицахъ и на 1 куб. см. и за одинъ циклъ, согласно уравненію (b), составляетъ 4π-ую часть площади, ограниченной обѣими вѣтвями кривой гистерезиса.

Хотя этотъ законъ очень важенъ для пониманія явленія гистерезиса, но на практикѣ должны были отказаться отъ опредѣленія потери энергіи на гистерезисъ путемъ нанесенія площади гистерезиса при помощи баллистическаго гальванометра. Независимо отъ того, что этотъ способъ отнимаетъ много времени, поставили себѣ за правило производить изслѣдованія сортовъ желѣза при тѣхъ же условіяхъ, при которыхъ происходитъ ихъ намагничиваніе во время работы. Поэтому намагничиваніе производятъ при помощи перемѣннаго тока и израсходованную при этомъ энергію измѣряютъ при помощи ваттметра, въ которомъ электродинамическое воздѣйствіе катушки съ глав-



Фиг. 72a. Фиг. 72b. Фиг. 72c. Фиг. 72d.

нымъ токомъ вызываетъ отклоненіе второй катушки, включенной въ отвѣтвленіе между зажимами рабочаго напряженія, и тѣмъ измѣряетъ число ваттъ.

Путемъ расчета потеря на гистерезисъ опредѣляется при помощи уравненія, установленнаго Штейнметцомъ: потеря энергіи на гистерезисъ на 1 куб. см. за одинъ циклъ пропорціональна максимальной индукціи, взятой въ 1,6 степени. Если η_h постоянный коэффиціентъ, который для различныхъ сортовъ желѣза различенъ, и V объемъ желѣза въ кубическихъ сантиметрахъ, то имѣемъ:

$$\frac{A}{V} = \eta_h \cdot B_{max}{}^{1,6}. \text{ эрговъ/куб. см.}$$

Законъ Штейнметца оказался вполнѣ справедливымъ только для индукцій до $B_{max} = 7\,000$, при чемъ коэффиціентъ η_h для наиболѣе употребительныхъ на практикѣ сортовъ желѣза находится въ предѣлахъ между 0,001÷0,004.

Если G будетъ вѣсъ желѣза въ килограммахъ, то при удѣльномъ вѣсѣ 7,7 объемъ въ кубическихъ сантиметрахъ будетъ равенъ:

$$V = \frac{G \cdot 1000}{7{,}7}.$$

Поэтому израсходованная мощность въ эргахъ въ секунду при $\sim$ періодахъ въ секунду [1]):

$$\eta_h \cdot B_{max}{}^{1,6} \cdot \frac{G \cdot 1000}{7{,}7} \sim \text{ эргъ въ секунду.}$$

На основаніи стр. 29,

$$1 \frac{\text{эргъ}}{\text{сек}} = 10^{-7} \frac{\text{джоулей}}{\text{сек}} = 10^{-7} \text{ ваттъ.}$$

Такимъ образомъ, потеря мощности въ ваттахъ будетъ:

$$P_h = \frac{\eta_h \cdot B_{max}{}^{1,6}\, G \cdot \sim \cdot 10^{-4}}{7{,}7} \text{ ваттъ.}$$

За послѣднее время отказываются отъ расчетовъ съ помощью коэффиціента Штейнметца η_h. Дѣло въ томъ, что когда расчетъ долженъ удовлетворять условіямъ практики и потеря на гистерезисъ опредѣляется при помощи перемѣннаго тока, то возникаетъ новое затрудненіе, ибо вмѣстѣ съ этою потерею измѣряются и другія потери, а именно потери на токи Фуко. Поэтому согласились принимать за потерю въ желѣзѣ расходъ всего числа ваттовъ на килограммъ желѣза при 50 періодахъ и индукціи 10 000. Эта потеря въ примѣняемомъ на практикѣ листовомъ желѣзѣ составляетъ отъ 3÷4 ваттъ на клг. Путемъ примѣненія особаго листового желѣза, представляющаго сплавъ съ алюминіемъ, можно значительно понизить расходы энергіи на гистерезисъ.

35. Мощность электромагнита.

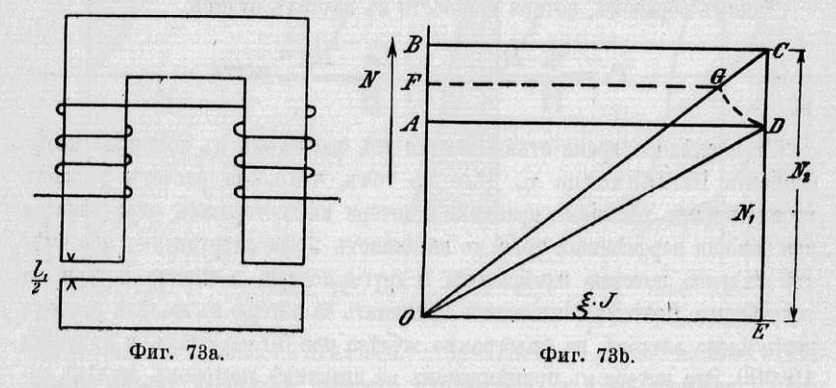
Въ статьѣ 28 мы разсмотрѣли тотъ случай, когда вся сообщаемая электрическая работа превращалась въ механическую. И наоборотъ, въ случаѣ, указанномъ въ статьѣ 32, вся сообщаемая электрическая работа во время образованія силового потока превращалась въ магнитную (потенціальную) энергію.

[1]) Для обозначенія числа періодовъ въ секунду употребляютъ $\sim$ значокъ, заимствованный изъ вида синусоиды.

Но своеобразныя явленія происходятъ при подъемѣ или притяженіи электромагнитомъ какой-либо желѣзной части, когда одновременно происходитъ затрата электрической энергіи и расходъ потенціальной [1]).

Примемъ ради упрощенія, что проницаемость желѣза изображеннаго на фиг. 73a электромагнита постоянна, и разсмотримъ сначала тотъ случай, когда обмотка приключена къ постоянному напряженію. Тогда сила тока до подъема и послѣ него будетъ одна и та же. Воздушный слой до подъема пусть будетъ $\frac{l_1}{2}$, послѣ подъема $\frac{l_2}{2}$; путь подъема тогда будетъ $\frac{l_1 - l_2}{2}$. Кривая намагничиванія, въ виду постоянства проницаемости желѣза, выразится прямой.

Отложимъ, теперь, число токовитковъ $\xi \cdot J$ по оси абсциссъ, а получаемый силовой потокъ N по оси ординатъ; тогда получимъ на фиг. 73b



Фиг. 73a. Фиг. 73b.

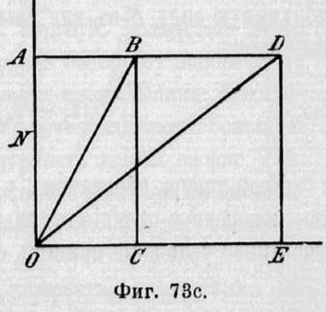
кривыя намагничиванія: до подъема нижнюю прямую, послѣ подъема, въ виду уменьшенія воздушнаго слоя, верхнюю прямую. Силовой потокъ послѣ подъема увеличился отъ $N_1 = DE$ до $N_2 = CE$. Но вмѣстѣ съ этимъ одновременно возрастетъ магнитная (потенціальная) энергія электромагнитовъ. Эта послѣдняя, согласно стр. 107, до подъема равна площади $OAD = OED$, послѣ подъема равна площади $OBC = OEC$, слѣдовательно, во время подъема увеличилась на величину, выражаемую площадью ODC. Такимъ образомъ, работа, затрачиваемая на подъемъ, не покрывается уменьшеніемъ магнитной (потенціальной) энергіи. Наоборотъ, изъ сѣти заимствуется электрическая энергія, которая превращается одновременно въ механическую работу и магнитную энергію. Когда же силовой потокъ во время подъема возрастаетъ, то индуктируется противоэлектродвижущая сила, которая, подобно указанному на стр. 107, должна преодолѣваться напряженіемъ у зажимовъ. Сила тока при этомъ на мгновеніе уменьшается и падаетъ примѣрно до того момента, когда якорь электромагнита коснется сердечника послѣдняго, съ величины $AD = OE$ до величины FG. Послѣ подъема она снова возрастаетъ до величины BC.

[1]) См. Emde, ETZ 1908. Стр. 817.

Мгновенное значеніе противоэлектродвижущей силы будетъ $-\xi \cdot \frac{dN}{dt}$, слѣдовательно, противодѣйствующее ей напряженіе у зажимовъ катушки будетъ $\xi \cdot \frac{dN}{dt}$. Если эту величину умножимъ на произвольно выбранный токъ J и время dt, то получимъ сообщаемую электрическую работу за время dt, равную $\xi \cdot J \cdot dN$. Тогда вся сообщаемая электрическая работа будетъ $\int \xi \cdot J \cdot dN$, что въ данномъ случаѣ изобразится площадью $ADGCB$.

Если мы предположимъ, что площадь DGC очень незначительна или, вслѣдствіе постоянства тока во время подъема, сдѣлается равной нулю, то сообщаемая электрическая работа будетъ равна площади $ABCD$, т. е. вдвое больше накопленной энергіи, которая выразится площадью ODC. Такимъ образомъ, мы приходимъ къ интересному выводу, что работа, израсходованная на подъемъ, равна приращенію накопленной энергіи. Эта закономѣрность имѣетъ мѣсто только тогда, когда проницаемость желѣза постоянна.

Теперь разсмотримъ случай, когда силовой потокъ OA путемъ измѣненія силы тока будетъ удерживаться во время подъема постояннымъ. Одновременно примемъ, что магнитное сопротивленіе желѣза по сравненію съ сопротивленіемъ воздушнаго слоя чрезвычайно незначительно. Тогда нижняя прямая на фиг. 73c кривой намагничиванія будетъ соотвѣтствовать большему воздушному слою, т. е. до подъема, тогда какъ верхняя прямая кривой намагничиванія—наименьшему воздушному слою, т. е. послѣ подъема. Такъ какъ число силовыхъ линій, согласно нашему предположенію, во время подъема не измѣняется, то противоэлектродвижущая сила и сообщаемая электрическая работа $\xi \cdot J \cdot dN$ равны нулю.



Фиг. 73c.

Такимъ образомъ, если не будетъ сообщаться никакой электрической работы, то произведенная механическая работа будетъ покрыта уменьше-

ніемъ потенціальной энергіи. Эта послѣдняя до испытанія была равна площади OAD, послѣ испытанія площади OAB, слѣдовательно, механическая работа $\boldsymbol{A}$ равнялась разности, т. е. площади OBD. Если $\boldsymbol{B}$ плотность силовыхъ линій въ воздушномъ слоѣ и $\boldsymbol{Q}_1$ поперечное сѣченіе этого послѣдняго, то $\boldsymbol{N}=\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{Q}_1$. Согласно этому механическая работа будетъ

$$\boldsymbol{A}_1=\frac{1}{2}\boldsymbol{N}\cdot BD=\frac{1}{2}\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{Q}\cdot BD.$$

Это уравненіе можетъ намъ послужить для опредѣленія подъемной силы электромагнита при заданной плотности силового потока. Для этой цѣли мы примѣнимъ къ обѣимъ вѣтвямъ тока OC и OE уравненіе (31) на стр. 88, которыя создаютъ одинаковую плотность силового потока $\boldsymbol{B}$. Такъ какъ проницаемость воздуха $\mu=1$, то имѣемъ

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{N}=\frac{4\pi\cdot OC}{\boldsymbol{l}_2}=\frac{4\pi\cdot OE}{\boldsymbol{l}_1}.$$

Отсюда получаемъ высоту подъема

$$\frac{\boldsymbol{l}_1-\boldsymbol{l}_2}{2}=\frac{2\pi(OE-OC)}{\boldsymbol{B}}=\frac{2\pi}{\boldsymbol{B}}\cdot BD.$$

Если раздѣлимъ, теперь, механическую работу $\boldsymbol{A}$ на высоту подъема $\frac{\boldsymbol{l}_1-\boldsymbol{l}_2}{2}$ и примемъ во вниманіе, что силовой потокъ, согласно нашему предположенію, во время подъема не измѣняется, то получимъ въ данномъ случаѣ постоянную во время подъема силу $\boldsymbol{f}$ въ динахъ. Чтобы получить подъемную силу F въ клг*, мы должны раздѣлить еще на 981 000, т. е. получаемъ

$$F=\frac{\boldsymbol{A}_1}{\frac{(\boldsymbol{l}_1-\boldsymbol{l}_2)}{2}\cdot 981\,000}=\frac{\boldsymbol{B}^2\cdot\boldsymbol{Q}_1\cdot 2}{8\pi\cdot 981\,000}.$$

Если, теперь, обозначимъ у подковообразнаго электромагнита двойное поперечное сѣченіе отдѣльныхъ вѣтвей сердечника черезъ $\boldsymbol{Q}$, то вышеуказанное уравненіе приметъ слѣдующій видъ:

$$F=4\boldsymbol{B}^2\cdot\boldsymbol{Q}\cdot 10^{-8}\text{ клг.}^* \quad \ldots\ldots\ldots \quad (36)$$

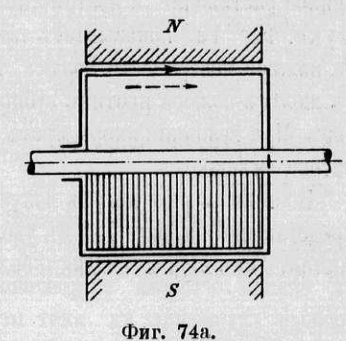
Положимъ, поперечное сѣченіе отдѣльной вѣтви $\boldsymbol{Q}_1=\frac{\boldsymbol{Q}}{2}=10$ кв. см и индукція $\boldsymbol{B}=18\,000$; тогда имѣемъ

$$F=4\cdot 18\,000^2\cdot 10\cdot 10^{-8}=260\text{ клг}^*.$$

Подъемная сила вслѣдствіе разсѣянія въ большинствѣ случаевъ больше, чѣмъ она опредѣляется изъ уравненія (36). Легко вывести, что уравненіе (36) пригодно также для электромагнитовъ съ однимъ только воздушнымъ слоемъ, при чемъ $\boldsymbol{Q}$ тогда обозначаетъ поперечное сѣченіе одного воздушнаго слоя.

36. Токи Фуко.

Подъ токами Фуко или круговыми токами разумѣютъ токи, которые идутъ не по предназначаемому для нихъ направленію, а замыкаются тамъ, гдѣ встрѣчаютъ наименьшее сопротивленіе. Такіе токи индуктируются, напримѣръ, при пересѣченіи силовыми линіями сплошныхъ массивныхъ проводниковъ. Путь ихъ трудно прослѣдить. Одно только можно сказать, что въ мѣстѣ, гдѣ происходитъ пересѣченіе силовыхъ линій, они перпендикулярны къ направленію этихъ линій и къ направленію движенія. Если, положимъ, имѣемъ (фиг. 74а) одинъ оборотъ мѣдной проволоки, навитой на сплошномъ желѣзномъ цилиндрѣ, и станемъ вращать его такимъ образомъ, что верхній проводникъ на фиг. 74а будетъ выходить изъ плоскости чертежа, то по правилу Фарадея индуктируемая въ немъ электродвижущая сила будетъ дѣйствовать по направленію, указанному стрѣлкою. Но равная по величинѣ электродвижущая сила индуктируется и въ расположенномъ подъ нимъ желѣзѣ. Вслѣдствіе этого въ желѣзѣ появляются токи, которые, благодаря большому поперечному сѣченію, слѣдов., незначительному сопротивленію, очень велики. Послѣдніе вызываютъ необычайное нагрѣваніе якоря и обусловливаютъ большую потерю энергіи. Это станетъ яснѣе, если разсматривать желѣзо на фиг. 74а, какъ динамомашину коротко замкнутую, на вращеніе которой необходимо затратить энергію, такъ какъ индуктированный токъ будетъ сопротивляться движенію.



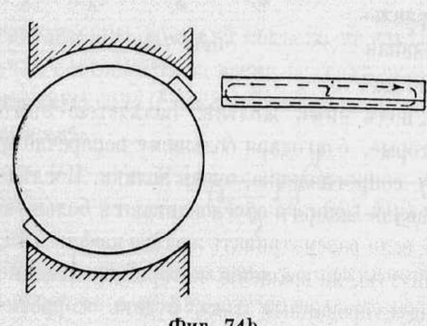
Фиг. 74а.

Расходъ энергіи на токи Фуко можно показать, напримѣръ, на такомъ простомъ опытѣ: подвѣсимъ мѣдный дискъ между полюсами электромагнита и сообщимъ ему колебательное движеніе. Какъ только электромагнитъ будетъ возбужденъ, дискъ застрянетъ между полюсами точно въ кашѣ, такъ какъ индуктировавшіеся токи Фуко будутъ противодѣйствовать его движенію (маятникъ Вальтенгофена). Жи-

вая сила маятника переходитъ въ тепло Джоуля, возникающее въ мѣдномъ дискѣ. Такимъ образомъ, токи Фуко во всякомъ случаѣ представляютъ расходъ электрической энергіи. Поэтому якорь машины обыкновенно составляютъ изъ ряда желѣзныхъ листовъ, какъ это показано на нижней половинѣ якоря, фиг. 74a. Желѣзные листы изолируются другъ отъ друга или при помощи слоя окиси ихъ, или лака, или по большей части папиросной бумагой. Вообще существуетъ правило: раздѣлять массы металла перпендикулярно направленію индуктируемой электродвижущей силы на отдѣльные слои, чтобы тѣмъ самымъ прервать путь токамъ Фуко.

При зубчатыхъ якоряхъ также необходимо, если это возможно, раздѣлять полюсныя надставки на отдѣльные слои, такъ какъ силовыя линіи стремятся проходить черезъ зубцы якоря (ср. фиг. 129). Въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ якорь выходитъ изъ-подъ полюсной надставки, онѣ испытываютъ временное растяженіе и поэтому индуктируютъ въ этихъ послѣднихъ токи Фуко. Фиг. 129 показываетъ также, что токи Фуко могутъ получиться и на нижней поверхности полюса, такъ какъ плотность магнитнаго потока въ желѣзѣ полюса противъ зубцовъ будетъ больше, чѣмъ противъ каналовъ. При вращеніи якоря мѣста большей и меньшей плотности магнитнаго потока смѣщаются.

Но токи Фуко могутъ получиться и въ мѣдныхъ частяхъ якоря, что представлено на фиг. 74b въ увеличенномъ масштабѣ. Положимъ, обмотка состоитъ изъ мѣдныхъ полосъ большого поперечнаго сѣченія; тогда по временамъ одинъ конецъ полосы будетъ находиться еще въ силовомъ полѣ, тогда какъ другой конецъ выйдетъ уже изъ раіона полюса. Ради ясности, подобная полоса представлена отдѣльно на чертежѣ справа. Хотя электродвижущая сила, индуктирующаяся въ верхней части проводника, гонитъ токъ, главнымъ образомъ, черезъ лобовыя соединенія и наружную сѣть, но съ другой стороны токъ замкнется также и черезъ нижнюю часть самого проводника по направленію пунктирной кривой. Устраняются токи Фуко скашиваніемъ или закругленіемъ краевъ полюсныхъ надставокъ или увеличеніемъ междужелѣзнаго пространства у краевъ полюса. Этимъ достигается довольно медленное ослабленіе силового поля. Но наиболѣе радикальнымъ средствомъ устраненія токовъ



Фиг. 74b.

Фуко является примѣненіе зубчатаго якоря. Силовыя линіи тогда, согласно фиг. 129, проходятъ почти всѣ черезъ зубцы и при вращеніи нѣсколько уклоняются, испытывая при этомъ удлиненіе. Затѣмъ всѣ онѣ мгновенно проходятъ сквозь все поперечное сѣченіе канала и поэтому индуктируютъ одновременно во всѣхъ частяхъ проводниковъ якоря, такъ что почти совершенно исключается образованіе токовъ Фуко.

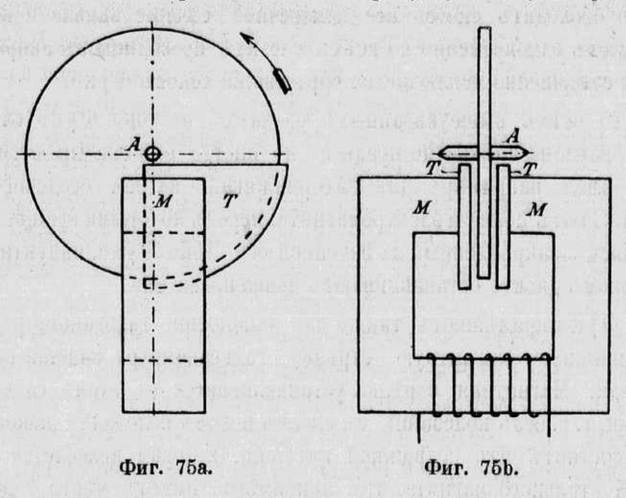
Хотя во всѣхъ вышеуказанныхъ случаяхъ на токи Фуко слѣдуетъ смотрѣть, какъ на абсолютно вредные, но иногда они оказываются и полезными. Такъ, напримѣръ, для затормаживанія вагона городского трамвая возбуждаютъ полюсы электромагнита, передъ которыми вращается желѣзный дискъ, закрѣпленный на вагонной оси. Токи Фуко, индуктируемые въ желѣзномъ дискѣ, останавливаютъ движеніе вагона.

Токи Фуко примѣняютъ также для успокоенія гальванометра, окружая подвижную магнитную стрѣлку гальванометра сплошнымъ кускомъ мѣди. Магнитная стрѣлка устанавливается въ этомъ случаѣ апеіодически, т. е. безъ колебаній, въ своемъ новомъ положеніи покоя. Если приборъ состоитъ изъ подвижной катушки, которая колеблется передъ полюсами стального магнита, что́, напримѣръ, имѣетъ мѣсто у зеркальнаго гальванометра, то успокоеніе ея при замыканіи катушки на короткое происходитъ подобнымъ же образомъ. Индуктируемые въ катушкѣ благодаря ея колебаніямъ токи часто моментально успокаиваютъ гальванометръ. Въ этомъ случаѣ, конечно, не имѣютъ больше дѣла съ токами Фуко,—тутъ имѣютъ мѣсто токи въ линейныхъ проводникахъ.

Здѣсь же слѣдуетъ указать на измѣрительные приборы для перемѣннаго тока, у которыхъ отклоненіе происходитъ благодаря динамическому дѣйствію токовъ Фуко (фиг. 75a и 75b). Подобнаго рода приборы, напримѣръ, Всеобщей Компаніи Электричества, состоятъ изъ электромагнита, между полюсами котораго помѣщается вращающійся на оси A металлическій дискъ, и двухъ металлическихъ пластинокъ T[1]). Въ то время, когда по катушкѣ электромагнита идетъ перемѣнный токъ, возникающія и исчезающія при этомъ силовыя линіи проходятъ сквозь дискъ и неподвижно закрѣпленныя пластины. Направленіе силового потока въ этомъ случаѣ происходитъ сверху внизъ или снизу вверхъ и токъ, индуктируемый въ металлическихъ пластинахъ и дискѣ внизу, направляется горизонтально. Такъ какъ токъ въ лѣвомъ кантѣ металлической пластинѣ T на

[1]) *ETZ* 1889. Стр. 82.

фиг. 75a идетъ вдоль этого послѣдняго, то онъ притягиваетъ лѣвую часть диска съ токомъ одинаковаго направленія. Вслѣдствіе этого получается вращающій моментъ, направленный въ сторону, указанную стрѣлкой. При



Фиг. 75a. Фиг. 75b.

этомъ не слѣдуетъ упускать изъ виду, что правая часть пластины T на фиг. 75a отогнута отъ диска, такъ что она не производитъ никакого дѣйствія на эту послѣднюю.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

37. Единицы длины, массы и времени въ абсолютной системѣ единицъ.

За единицу длины въ абсолютной системѣ единицъ принимается сантиметръ. Послѣдній представляетъ собою сотую часть сохраняющагося въ Парижѣ нормальнаго эталона метра, который равенъ приблизительно одной 10-милліонной части четверти земного меридіана, проходящаго черезъ Парижъ. Такимъ образомъ, длина въ абсолютной системѣ единицъ измѣряется въ сантиметрахъ. Въ силу того, что всѣ величины, измѣряемыя въ абсолютной системѣ единицъ, обозначены у насъ жирными буквами, то и длину въ сантиметрахъ условимся обозначать черезъ $\mathbf{l}$. Простою же буквою l будемъ обозначать длину въ метрахъ.

За единицу массы въ абсолютной системѣ единицъ принимаютъ граммъ. Послѣдній опредѣляется, какъ масса одного куб. сант. воды при 4°C, или какъ масса, вѣсящая столько же, сколько 1 куб. сант. воды. Вѣсъ тѣла въ граммахъ выражаетъ массу даннаго тѣла въ абсолютныхъ единицахъ.

Это положеніе довольно просто, но для начинающаго все же представляетъ нѣкоторыя затрудненія, такъ какъ онъ привыкъ въ техникѣ для

опредѣленія массы тѣла дѣлить вѣсъ въ клг на ускореніе отъ силы тяжести. Тѣло вѣситъ, напримѣръ, 9,81 клг. Масса его въ обыкновенной технической системѣ единицъ составляетъ 9,81 : 9,81, т. е. 1 техническую единицу массы. Масса же его въ абсолютной системѣ единицъ, наоборотъ, будетъ равняться его вѣсу въ граммахъ, т. е. $9{,}81 \cdot 1\,000 = 9\,810$ гр.

Слѣдовательно, техническая единица массы равняется 9 810 абсол. един. массы, и послѣ болѣе подробнаго разсмотрѣнія мы теперь видимъ, что высказанное выше положеніе представляетъ не больше трудностей, чѣмъ такое простое положеніе: 1 метр = 100 сант. Преодолѣвъ такимъ образомъ, первое затрудненіе, мы видимъ, что выборъ именно грамма за единицу массы является и практичнымъ, и простымъ. Принявъ систему абсолютныхъ единицъ, мы должны, понятно, отказаться отъ измѣренія силъ тѣми простыми единицами, какія употребительны въ техникѣ. Массы, выраженныя въ граммахъ, будемъ обозначать буквою $\boldsymbol{M}$.

За единицу времени принята секунда. Она опредѣляется, какъ $\frac{1}{86\,400}$ часть среднихъ солнечныхъ сутокъ. Время въ секундахъ будемъ обозначать буквою $\boldsymbol{t}$.

Большинство же остальныхъ величинъ, какъ, напримѣръ, скорость, работа и др., можно представить въ видѣ функцій или **измѣреній** длины, массы и времени. Такъ какъ выраженіе «измѣреніе» можетъ представить въ началѣ нѣкоторое затрудненіе, то разъяснимъ его на нѣсколькихъ особенно простыхъ примѣрахъ. Такъ, напримѣръ, площадь есть второе измѣреніе длины, равнымъ образомъ объемъ третье измѣреніе длины. Такимъ образомъ, площадь и объемъ суть измѣренія или функціи длины, т. е. такія величины, размѣры которыхъ получаются путемъ вычисленія изъ единицъ длины. Равнымъ образомъ, скорость есть измѣреніе или функція длины и времени, такъ какъ численная ея величина получается при раздѣленіи длины на время. Подобнымъ же образомъ мы можемъ большинство изъ встрѣчающихся величинъ представить въ видѣ функцій длины (L), массы (M) и времени (T). Измѣреніе площади, напримѣръ, L^2, объема L^3 и скорости LT^{-1}.

Но въ то же время оказывается, что **единицы** различныхъ величинъ въ абсолютной системѣ единицъ не могутъ теперь уже выбираться произвольно,—онѣ должны необходимо вытекать изъ ранѣе выбранныхъ единицъ—сантиметръ, граммъ, секунда. Такъ, напримѣръ, за единицу площади необходимо принять квадр. сантиметръ, за единицу объема куб. сант., за единицу скорости сантим. въ секунду. Если величина измѣрена въ абсолютныхъ единицахъ, то послѣ численной величины ея ставятъ

значокъ (CGS). Выведемъ, теперь, измѣренія различныхъ величинъ, выразимъ отсюда ихъ единицы въ абсолютной системѣ и сравнимъ эти единицы съ практическими.

38. Измѣренія и единицы скорости, ускоренія и силы.

a) Скорость.

Скорость опредѣляется, какъ отношеніе пути ко времени, или путь, пройденный въ единицу времени. Такимъ образомъ, получаемъ:

$$\text{Измѣреніе скорости: } \frac{L}{T} = LT^{-1}.$$

Пусть $\boldsymbol{v}$ означаетъ скорость въ абсол. единицахъ; тогда:

$$v = \frac{l}{t}\,\frac{\text{сант}}{\text{сек}}.$$

Абсолютная единица скорости — сантиметръ въ секунду или 1 $\frac{\text{сант.}}{\text{сек.}}$

Примѣръ. Положимъ, діаметръ якоря альтернатора равенъ 1,6 мтр., число оборотовъ въ мин. 300. Требуется опредѣлить окружную скорость въ абсолютныхъ единицахъ.

Имѣемъ:

Окружность якоря . . . . . $1{,}6\pi = 5$ мтр.
Путь въ минуту. . . . . . $5 \cdot 300 = 1\,500$

Выразивъ путь въ сант. и время въ секунд., получаемъ:

$$l = 1\,500 \cdot 100 = 150\,000 \text{ сант.}$$
$$t = 60 \text{ сек.}$$

Отсюда окружная скорость:

$$v = \frac{l}{t} = \frac{150\,000}{60} = 2\,500\,\frac{\text{сант.}}{\text{сек.}} = 2\,500 \text{ (cgs)}.$$

b) Ускореніе.

Ускореніе есть приращеніе скорости въ единицу времени, или отношеніе приращенія скорости ко времени.

$$\text{Ускореніе} = \frac{\text{приращеніе скорости}}{\text{время}}.$$

Измѣренія приращенія скорости при этомъ таково же, какъ и самой скорости, т. е. $L \cdot T^{-1}$. Поэтому:

$$\text{измѣреніе ускоренія: } \frac{L \cdot T^{-1}}{T} = L \cdot T^{-2}.$$

Если, теперь, v_1 начальная скорость, v_2 конечная скорость, и ускореніе равномѣрное, то въ абсолютныхъ единицахъ оно выражается:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t} \text{ (cgs)}.$$

Абсолютную единицу ускоренія, слѣдовательно, имѣетъ тѣло, скорость котораго въ секунду увеличивается на абсол. единицу, т. е. на 1 сант/сек.

Примѣръ. Пусть начальная скорость равна 0, конечная скорость послѣ 3 сек. 29,43 мтр въ сек. Какъ велико ускореніе, выраженное въ абсолютныхъ единицахъ?

Имѣемъ:

$$v_1 = 0 \qquad v_2 = 29{,}43 \cdot 100 \text{ см}, \qquad t = 3.$$

Поэтому

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t} = \frac{2\,943}{3} = 981 \frac{\text{сант}}{\text{сек}^2} = 981 \text{ (cgs)}.$$

Какъ видимъ, этотъ примѣръ представляетъ собою случай свободнаго паденія. Кромѣ того отсюда видимъ, что результатъ получается въ абсолютныхъ единицахъ только тогда, когда отдѣльныя величины, входящія въ расчетъ, выражены въ абсолютныхъ единицахъ. Въ то же время для насъ становится яснымъ, что ускореніе нельзя выражать, какъ это часто дѣлаютъ, одними сантиметрами или сант. въ секунду, но непремѣнно сант-сек². Подобно тому, какъ площадь нельзя выражать просто сантиметрами, такъ и ускореніе нельзя выражать въ единицахъ, которыя пригодны только для скорости (напримѣръ: 1 лошад. сила равна не 75 клгр-мтр, а 75 клгр-мтр въ секунду). Небрежность въ выраженіяхъ ведетъ къ путаницѣ. Сравнивать между собою можно только такія величины, измѣренія которыхъ одинаковы, и ошибка при расчетѣ можетъ быть замѣчена просто потому, что измѣренія обѣихъ частей уравненія оказываются неодинаковыми. Поэтому очень важно пріучить себя къ совершенной точности при указаніи измѣреній и развить въ себѣ въ этомъ отношеніи особый навыкъ.

c) *Сила.*

Сила въ механикѣ опредѣляется какъ произведеніе массы на ускореніе.

Сила = масса на ускореніе.

Такимъ образомъ, получаемъ:

$$\text{Измѣреніе силы: } M \cdot L \cdot T^{-2} = M \cdot L \cdot T^{-2}\text{ [1]}.$$

Пусть, теперь, f сила и M масса въ абсолютныхъ единицахъ; тогда имѣемъ:

$$f = M \cdot a.$$

Абсолютная единица, слѣдовательно, есть сила, которая сообщаетъ абсолютной единицѣ массы или 1 куб сант воды ускореніе, равное 1 см/сек². Силу эту называютъ диной.

Примѣръ. Какъ велика сила, съ которою земля притягиваетъ тяжесть вѣсомъ въ 1 клг.

Мы имѣемъ:

$$1 \text{ клг} = 1\,000 \text{ гр}.$$

$$9{,}81 \text{ мтр/сек.}^2 = 981 \text{ сант/сек}^2.$$

Поэтому въ абсолютныхъ единицахъ получаемъ:

$$M = 1\,000, \qquad a = 981.$$

Тогда:

$$f = 1\,000 \cdot 981 \text{ (cgs)} = 981\,000 \text{ динъ}.$$

Вѣсъ въ 1 клг или техническая единица силы равна, слѣдовательно, 981 000 динъ. Если введемъ, теперь, для вѣса килограммъ обозначеніе: клг*, то получаемъ:

$$1 \text{ клг}^* = 981\,000 \text{ динъ}.$$

$$1 \text{ дина} = \frac{1}{981\,000} \text{ клг}^* = 1{,}02 \text{ млг}^*.$$

---

[1]) Отъ опредѣленія силы, даваемаго въ механикѣ, отличается опредѣленіе ея, встрѣчающееся въ астрономіи. По закону всемірнаго тяготѣнія въ его простѣйшей формѣ имѣемъ:

$$f = \frac{m \cdot m}{r^2},$$

гдѣ f означаетъ силу, m массу, а r разстояніе. Измѣреніе силы въ астрономическихъ единицахъ отсюда будетъ: $M^2 L^{-2}$. Приравнять другъ къ другу обѣ эти величины было бы невозможно (ср. неодинаковыя измѣренія количествъ электричества въ электростатическихъ и абсолютныхъ единицахъ, стр. 131). Во всякомъ случаѣ эта разница между измѣреніями силы въ абсолютной системѣ и астрономической системѣ единицъ указываетъ, что измѣреніе не основывается только на сущности самой измѣряемой величины, или что измѣреніе не исчерпываетъ вполнѣ всей сущности самой измѣряемой величины.

39. Измѣренія и единицы магнитной массы, напряженія поля и магнитнаго потока.

a) Магнитная масса.

Магнитная масса или количество свободно дѣйствующаго въ пространствѣ магнетизма измѣряется силою, развиваемою при извѣстныхъ условіяхъ полюсомъ. По закону Кулона, сила, съ которою дѣйствуютъ другъ на друга два полюса, выражается слѣдующимъ образомъ:

$$f = \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

гдѣ m_1 и m_2 магнитныя массы обоихъ полюсовъ, а r разстояніе между ними. Отбросимъ теперь, пока дѣло не идетъ о численномъ значеніи, значки у обоихъ m; тогда получаемъ:

$$f = \frac{m \cdot m}{r^2},$$

откуда

$$m = r \cdot \sqrt{f}.$$

Слѣдовательно, для полученія измѣренія магнитной массы необходимо извлечь квадратный корень изъ измѣренія силы, и полученный результатъ умножить на измѣреніе разстоянія r, т. е. на длину. Такимъ образомъ, получаемъ:

Измѣреніе магнитной массы: $L . \sqrt{L \cdot M \cdot T^{-2}} = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$.

Слѣдовательно, по закону Кулона, единицей магнитной массы обладаетъ тотъ полюсъ, который на одноименный полюсъ 1 на разстояніи одного сантиметра дѣйствуетъ съ силой въ 1 дину. Было предложено эту единицу называть 1 веберъ, но это названіе не удержалось.

b) Напряженіе поля.

Сила, съ которою какое-нибудь магнитное поле дѣйствуетъ на полюсъ, согласно ур. (12), стр. 18, будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше будутъ напряженія поля и магнитная масса полюсовъ:

$$f = m \cdot H.$$

Откуда получаемъ:

$$H = \frac{f}{m}.$$

Нужно пріучаться выражать словами подобнаго рода уравненія. Напряженія поля H есть сила на единицу полюса или сила, дѣйствующая на полюсъ 1. Измѣреніе ея, слѣдовательно, получимъ, раздѣливъ измѣреніе силы на измѣреніе магнитной массы полюса. Тогда получаемъ:

Измѣреніе напряженія поля: $\frac{L \cdot M \cdot T^{-2}}{L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}} = L^{-\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$.

Единицу напряженія, слѣдовательно, имѣетъ поле, которое дѣйствуетъ на полюсъ 1 съ силою въ 1 дину.

Примѣръ: На сѣверный полюсъ въ 100 абсолютныхъ единицъ дѣйствуетъ магнитное поле съ силою въ 20 динъ. Каково напряженіе поля?

Получаемъ:

$$H = \frac{f}{m} = \frac{20}{100} = 0{,}2 \text{ (cgs)}.$$

c) Магнитный потокъ.

Согласно статьѣ 21, число силовыхъ линій на квадр. сант. составляетъ напряженіе поля. Силовой потокъ N, поэтому, равенъ произведенію напряженія поля на площадь:

$$N = H \cdot Q.$$

Измѣреніе силового потока, слѣдовательно, можно получить, умножая измѣреніе напряженія поля на измѣреніе площади.

Измѣреніе силового потока: $L^2 \cdot L^{-\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$.

Единица силового потока на квадр. сант. существуетъ тамъ, гдѣ на полюсъ 1 дѣйствуетъ сила въ 1 дину. Но тутъ замѣчаемъ, что измѣреніе магнитнаго потока одинаково съ измѣреніемъ магнитной массы полюса. Это согласованіе происходитъ потому, что магнитный потокъ полюса, согласно ур. (15) на стр. 26, опредѣляется путемъ умноженія магнитной массы полюса на 4π:

$$N = 4\pi \cdot m.$$

Такимъ образомъ, если величина магнитнаго потока разнится отъ величины магнитной массы полюса только на постоянный множитель 4π, то измѣренія ихъ одинаковы. Поэтому силовую линію можно опредѣлить просто какъ 4π-ую часть силового потока, исходящаго изъ полюса 1.

40. Измѣренія и единицы электродвижущей силы, силы тока, количества электричества и сопротивленія.

а) Электродвижущая сила.

Электродвижущая сила опредѣляется числомъ силовыхъ линій, пересѣкаемыхъ въ секунду. Отсюда:

$$\text{Измѣреніе электродвижущей силы: } L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-2}.$$

Абсолютная единица электродвижущей силы индуктируется тогда, когда въ секунду пересѣкается одна силовая линія. 10^8 абсолютныхъ единицъ называютъ 1 вольтомъ.

1 вольтъ $= 10^8$ пересѣкаемыхъ силовыхъ линій въ секунду $= 10^8$ (cgs).

Если E обозначаетъ электродвижущую силу въ вольтахъ и въ катушку съ ξ витками входитъ за время dt силовыхъ линій dN, тогда

$$E = -\xi \cdot \frac{dN}{dt} \cdot 10^{-8}$$

или, согласно ур. (28) на стр. 79,

$$E = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{l} \cdot \boldsymbol{v} \cdot 10^{-8}.$$

b) Сила тока.

Въ полѣ $\boldsymbol{H}$ на проводникъ длины $\boldsymbol{l}$, по которому идетъ токъ $\boldsymbol{J}$, дѣйствуетъ сила, которая, согласно уравн. (30) на стр. 82, равна:

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{J} \cdot \boldsymbol{l}.$$

Откуда сила тока въ абсолютныхъ единицахъ

$$\boldsymbol{J} = \frac{\boldsymbol{f}}{\boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{l}}.$$

Слѣдовательно, измѣреніе силы тока получается изъ измѣреній силы, напряженія поля и длины:

$$\text{Измѣреніе силы тока: } \frac{L \cdot M \cdot T^{-2}}{L^{-\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot L} = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}.$$

Абсолютную единицу силы имѣетъ токъ, который, протекая вдоль 1 сант. въ полѣ напряженія 1, развиваетъ силу въ 1 дину. Десятая доля этой абсолютной единицы произвольно принята за практическую единицу и названа амперомъ:

$$1 \text{ амперъ} = \frac{1}{10} \text{ (cgs).}$$

Слѣдовательно, число амперъ всегда въ 10 разъ больше, чѣмъ такое же число абсолютныхъ единицъ.

Законодательными установленіями амперъ опредѣляется какъ сила тока, выдѣляющая изъ раствора азотнокислаго серебра 1,118 млг серебра въ секунду.

c) Количество электричества.

Такъ какъ сила тока есть количество электричества, протекающее въ секунду черезъ поперечное сѣченіе, то количество электричества, протекшаго за нѣкоторое время, есть произведеніе изъ силы тока на время. Отсюда:

$$\text{Измѣреніе количества электричества: } L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot T = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}}.$$

Если сила тока равняется абсолютной единицѣ, то черезъ поперечное сѣченіе въ секунду протекаетъ абсолютная единица количества электричества. Слѣдовательно, десятая часть, соотвѣтствующая 1 амперу, является практической единицею и называется кулономъ.

$$1 \text{ кулонъ} = \frac{1}{10} \text{ (cgs).}$$

Пусть Q означаетъ количество электричества въ кулонахъ, тогда имѣемъ:

$$Q = i \cdot t.$$

Производными единицами отъ кулона являются:

$$1 \text{ микрокулонъ} = \frac{1}{10^6} \text{ кулона} = 10^{-6} \text{ кулоновъ.}$$

$$1 \text{ амперъ-часъ} = 3\,600 \text{ кулоновъ.}$$

Иное измѣреніе количества электричества получается въ электростатическихъ единицахъ. На основаніи закона Кулона для электричества, сила, съ которою дѣйствуютъ другъ на друга два количества электричества, выражается уравненіемъ:

$$\boldsymbol{f} = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

гдѣ m_1 и m_2 количества электричества въ электростатическихъ единицахъ. Электростатическою единицей будетъ количество электричества, которое на равное количество электричества на разстояніи 1 сант. дѣйствуетъ съ силою въ 1 дину. Это количество въ $3 \cdot 10^9$ раза меньше кулона, т. е. $3 \cdot 10^{10}$ раза меньше абсолютной единицы электрическаго

тока. Измѣреніе количества электричества въ электростатическихъ единицахъ:

$$\text{измѣр. } m = \text{измѣр. } r\sqrt{f} = L^{\frac{3}{2}}\cdot M^{\frac{1}{2}}\cdot T^{-1}.$$

Измѣренія количества электричества въ статическихъ и динамическихъ единицахъ отличаются не только на численный множитель $3\cdot 10^{10}$, но и въ самомъ выраженіи измѣренія у одного изъ нихъ имѣется множитель $L\cdot T^{-1}$, т. е. измѣреніе скорости.

Это особенно хорошо уясняется при помощи опыта Роуланда: колесу, наэлектризованному такимъ образомъ, что на каждый сантиметръ дуги окружности приходится 1 электростатическая единица, сообщаютъ вращеніе со скоростью $3\cdot 10^{10}\,\frac{\text{сант}}{\text{сек}} = 300\,000\,\frac{\text{клм}}{\text{сек}}$. Тогда эта статическая единица, перемѣщающаяся вмѣстѣ съ проводникомъ, производитъ такое же магнитное дѣйствіе, какъ токъ съ силою въ одну абсолютную единицу, идущій по круговому контуру. При этомъ $300\,000\,\frac{\text{клм}}{\text{сек}}$ одновременно является скоростью свѣта и электричества.

d) Сопротивленіе.

Сопротивленіе опредѣляется, какъ отношеніе электродвижущей силы къ силѣ тока:

$$w = \frac{E}{i},$$

тогда:

$$\text{Измѣреніе сопротивленія: } \frac{L^{\frac{3}{2}}\cdot M^{\frac{1}{2}}\cdot T^{-2}}{L^{\frac{1}{2}}\cdot M^{\frac{1}{2}}\cdot T^{-1}} = L\cdot T^{-1}.$$

Измѣреніе сопротивленія, слѣдовательно, одинаково съ измѣреніемъ скорости,—и абсолютною единицею послѣдняго, какъ это ни звучитъ странно, является сантиметръ въ секунду. Это—сопротивленіе, въ которомъ очень небольшая абсолютная единица электродвижущей силы производитъ относительно большую единицу силы тока. 10^9 такихъ абсолютныхъ единицъ сопротивленія составляютъ 1 омъ. Послѣдній представляетъ собою сопротивленіе, въ которомъ вольтъ даетъ токъ въ 1 амперъ.

$$1 \text{ омъ} = 10^9\ (cgs).$$

Законодательными установленіями омъ опредѣляется, какъ сопротивленіе ртутнаго столбика поперечнаго сѣченія въ 1 мм² и длины въ 106,3 сант.

Изъ опредѣленія законодательными установленіями ома и ампера вытекаетъ опредѣленіе, даваемое тѣми же установленіями, вольта: вольтъ есть напряженіе, которое при сопротивленіи въ 1 омъ даетъ силу тока 1 амперъ, или наоборотъ: вольтъ есть напряженіе, которое создается при токѣ въ 1 амперъ, на концахъ сопротивленія въ 1 омъ.

41. Измѣренія и единицы работы, теплоты и мощности.

a) Работа.

Механическая работа опредѣляется, какъ произведеніе силы на пройденный путь[1]). Откуда ея измѣреніе:

$$\text{Измѣреніе работы: } L^2\cdot M\cdot T^{-2}.$$

Слѣдовательно, абсолютная единица работы, производится тогда, когда сила въ одну дину дѣйствуетъ вдоль пути длиною въ 1 сант. Эту абсолютную единицу работы называютъ дино-сантиметромъ или эргомъ. Пусть A работа въ эргахъ и s путь въ сант., тогда имѣемъ:

$$A = f\cdot s.$$

Примѣръ. Какъ велика въ эргахъ работа, затрачиваемая на поднятіе груза вѣсомъ въ 1 клг на высоту 1 мтр?

Имѣемъ:

$$1 \text{ клг}^* = 981\,000 \text{ динъ},$$
$$1 \text{ мтр} = 100 \text{ сант.},$$
$$f = 981\,000, \qquad s = 100,$$
$$A = f\cdot s = 981\,000\cdot 100 = 9{,}81\cdot 10^7 \text{ эрговъ}.$$

Слѣдовательно, килограммометръ или техническая единица работы равняется $9{,}81\cdot 10^7$ эргамъ.

Если, теперь, произведеніе $E\cdot i\cdot t$, на основаніи статьи 10, представляетъ электрическую работу, то необходимо имѣть ея измѣреніе. Послѣднее найдется путемъ перемноженія измѣреній электродвижущей силы, силы тока и времени. Абсолютною единицей электрической работы, понятно, является также эргъ.

Такъ какъ вольтъ равенъ 10^8 (cgs.) и амперъ равенъ 10^{-1} (cgs), то 1 джоуль или произведеніе 1 вольта $\times$ 1 амперъ $\times$ 1 сек составитъ, слѣдовательно, $10^8\cdot 10^{-1}$ абсолютныхъ единицъ работы или 10^7 эрговъ.

$$1 \text{ джоуль} = 10^7 \text{ эрговъ}.$$

---

[1]) Если сила дѣйствуетъ по направленію пути.

Затѣмъ мы имѣли выше:

$$1 \text{ клг-мтр} = 9{,}81 \cdot 10^7 \text{ эрговъ},$$

откуда слѣдуетъ:

$$1 \text{ клг-мтр} = 9{,}81 \text{ джоуля}.$$

b) Теплота.

Такъ какъ теплота эквивалентна работѣ, то ея измѣреніе одинаково съ измѣреніемъ работы. Но такъ какъ шкала термометра выбрана произвольно, то не слѣдуетъ удивляться тому, что въ формулу, выражающую законъ Джоуля, входитъ постоянный множитель, который, напримѣръ, въ законахъ Ома, Кулона упраздняется (собственно точно равенъ 1) путемъ соотвѣтственнаго выбора единицъ. Вѣдь на самомъ дѣлѣ никакого соотношенія съ абсолютной системою единицъ мы не устанавливаемъ, когда за единицу теплоты принимаемъ количество теплоты, которое нагрѣваетъ 1 гр. воды отъ 0° С. до одного градуса. Эту единицу называютъ малою калоріей. Ея соотношеніе съ механической работой опредѣляется при помощи установленнаго опытнымъ путемъ механическаго эквивалента теплоты, при чемъ 1 большая калорія (1 клг воды) = 427 клг-мтр. Отсюда:

$$1 \text{ малая калорія} = 0{,}427 \text{ клг-мтр}.$$

Такъ какъ килограммометръ равенъ 9,81 джоуля, то получаемъ:

$$1 \text{ малая калорія} = 0{,}427 \cdot 9{,}81 = \frac{1}{0{,}24} \text{ джоуля}.$$

или

$$1 \text{ джоуль} = 0{,}24 \text{ мал. калоріи}.$$

Это только другое выраженіе закона Джоуля, по которому количество теплоты Q_W въ малыхъ калоріяхъ выражается слѣдующимъ образомъ:

$$Q_W = 0{,}24\, E \cdot i \cdot t.$$

c) Мощность.

Мощность или эффектъ есть работа, произведенная въ единицу времени.

$$\text{Мощность} = \frac{\text{работа}}{\text{время}}.$$

Откуда слѣдуетъ:

$$\text{Измѣреніе мощности: } L^2 \cdot M \cdot T^{-3}.$$

Абсолютная единица мощности есть эргъ въ секунду. Эта единица чрезвычайно мала, и поэтому за единицу принимаютъ 10^7 эрговъ въ секунду, что называютъ «ваттомъ».

$$1 \text{ ваттъ} = 10^7 \text{ эрговъ въ секунду} = 1 \text{ джоулю въ секунду}.$$

Такъ какъ электрическая работа въ джоуляхъ равнялась произведенію $E \cdot i \cdot t$, то $E \cdot i$ электрическая работа въ джоуляхъ въ секунду или ваттахъ. Пусть P мощность въ ваттахъ, тогда:

$$P = E \cdot i.$$

Примѣръ. Сколько ваттъ соотвѣтствуютъ 1 лошадиной силѣ? Имѣемъ:

$$1 \text{ лош. сила} = 75 \text{ клг-мтр/сек}.$$

$$1 \frac{\text{клг-мтр.}}{\text{сек.}} = 9{,}81 \frac{\text{джоул.}}{\text{сек.}} = 9{,}81 \text{ ватта}.$$

Отсюда

$$1 \text{ лош. сила} = 75 \cdot 9{,}81 \text{ ватта} = 736 \text{ ваттъ}.$$

42. Измѣренія и единицы коэффиціента самоиндукціи и емкости.

a) Коэффиціентъ самоиндукціи.

Согласно статьѣ 32, коэффиціентъ самоиндукціи въ генри выражается черезъ:

$$L = \frac{4\pi \cdot \xi^2 \cdot \mu \cdot Q}{l} \cdot 10^{-9}.$$

Если въ уравн. (35) стр. 102 сила тока и электродвижущая сила будутъ выражены въ абсол. единицахъ, то, такъ какъ абсолютная единица силы тока составляетъ 10 амперъ, а абсолютная единица напряженія 10^{-8} вольтъ, то получаемъ коэффиціентъ самоиндукціи въ абсолютныхъ единицахъ равнымъ:

$$\frac{4\pi \cdot \xi \cdot \mu \cdot Q}{l}.$$

Такъ какъ 4π, ξ, μ суть отвлеченныя числа, то

$$\text{Измѣреніе коэффиціента самоиндукціи: } \frac{L^2}{L} = L.$$

Слѣдовательно, измѣреніе есть длина и единицею самоиндукціи является сантиметръ. 1 генри тогда равенъ 10^9 абсолютныхъ единицъ или 10^9 сант. Но 10^9 сант. составляютъ 10 000 клм. или четверть земной окружности.

Поэтому раньше практическую единицу коэффициента самоиндукціи наз. также квадрантомъ. Катушка, у которой величина $\frac{4\pi\cdot\xi^2\cdot\mu\cdot Q}{l}\cdot 10^{-9}=1$ или у которой индуктируется напряженіе въ 1 вольтъ, когда сила тока равномѣрно возрастаетъ на 1 амперъ, имѣетъ самоиндукцію, равную 1 генри.

b) *Емкость.*

Конденсаторъ состоитъ изъ двухъ наивозможно близко расположенныхъ металлическихъ пластинъ, отдѣляемыхъ одна отъ другой изолирующимъ слоемъ, такъ называемымъ діэлектрикомъ. Когда обѣ пластины соединены съ зажимами источника электричества, тогда конденсаторъ заряжается, при чемъ положительное электричество течетъ на одну пластину, отрицательное на другую. Это перетеканіе продолжается до тѣхъ поръ, пока противодавленіе конденсатора не уравновѣситъ напряженія источника электричества. Количество электричества Q, которое можно накопить въ конденсаторѣ, тѣмъ больше, чѣмъ больше напряженіе источника тока и чѣмъ больше емкость C конденсатора. Послѣдняя пропорціональна площади пластинъ и обратно пропорціональна разстоянію между ними; она зависитъ также и отъ природы діэлектрика.

Такимъ образомъ получаемъ:

Количество электричества = напряженію $\times$ емкость.

Поэтому измѣреніе емкости получимъ, раздѣливъ измѣреніе количества электричества на измѣреніе напряженія:

$$\text{Измѣреніе емкости: } \frac{L^{\frac{1}{2}}\cdot M^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{3}{2}}\cdot M^{\frac{1}{2}}\cdot T^{-2}} = L^{-1}\cdot T^{2}.$$

Такимъ образомъ, абсолютную единицу емкости имѣетъ конденсаторъ, который заряжается абсолютной единицей количества электричества при напряженіи въ одну абсолютную единицу или у котораго при абсолютной единицѣ количества электричества напряженіе доводится до 1 абсолютной единицы. Но намъ уже извѣстно, что абсолютная единица напряженія чрезвычайно мала, а именно, составляетъ $\frac{1}{100}$ милліонную часть вольта. Абсолютная же единица количества электричества, напротивъ, чрезвычайно велика, а именно равна 10 кулонамъ. Поэтому конденсаторъ, который долженъ обладать единицей емкости, долженъ имѣть невѣроятные размѣры, если онъ, несмотря на большой зарядъ, долженъ оказывать совершенно незначительное противодавленіе. Вслѣдствіе этого отъ абсолютной единицы

отказались и за практическую единицу приняли емкость конденсатора, который однимъ вольтомъ заряжается на одинъ кулонъ или, наоборотъ, у котораго однимъ кулономъ (противо-) напряженіе доводится до 1 вольта. Эту единицу называютъ фарадою. Если обозначимъ черезъ C емкость въ фарадахъ и черезъ Q количество электричества въ кулонахъ, то имѣемъ:

$$Q = C\cdot E \text{ кулоновъ}$$

или

$$C = \frac{Q}{E} \text{ фарадъ} \ldots \ldots \quad (37)$$

Соотношеніе между фарадою и абсолютной единицей получаемъ изъ слѣдующаго уравненія:

$$1 \text{ фарада} = \frac{1 \text{ кулонъ}}{1 \text{ вольтъ}} = \frac{10^{-1} \text{ cgs}}{10^{8} \text{ cgs}} = 10^{-9} \text{ cgs}.$$

Фарада, слѣдовательно, равна 10^{-9} абсолютныхъ единицъ.

На практикѣ фарада иногда является очень большою единицей, поэтому въ такихъ случаяхъ примѣняютъ ея производную—микрофараду.

$$1 \text{ микрофарада} = \frac{1}{10^{6}} \text{ фарады} = 10^{-6} \text{ фарадъ}.$$

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

43. Кольцевая обмотка двухполюсныхъ машинъ.—44. Барабанная обмотка двухполюсныхъ машинъ. — 45. Кольцевой якорь съ параллельнымъ соединеніемъ.—46. Барабанная обмотка съ параллельнымъ соединеніемъ.—47. Кольцевая обмотка съ послѣдовательнымъ соединеніемъ.—48. Барабанная обмотка съ послѣдовательнымъ соединеніемъ.—49. Кольцевая обмотка съ послѣдовательно-параллельнымъ соединеніемъ.—50. Барабанная обмотка съ послѣдовательно-параллельнымъ соединеніемъ.

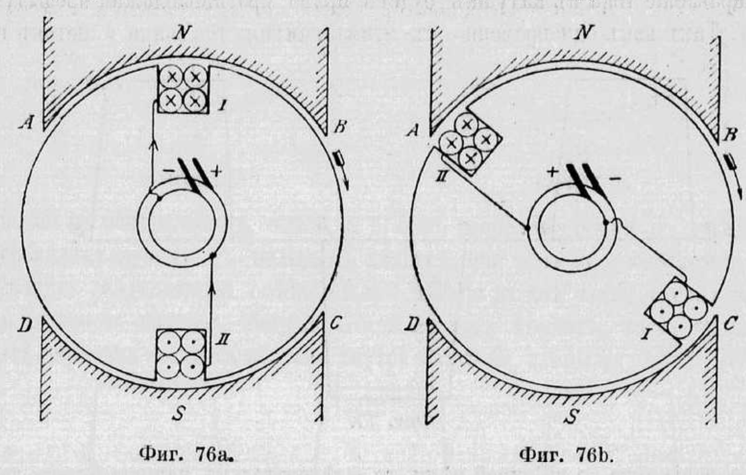
---

43. Кольцевая обмотка двухполюсныхъ машинъ [1]).

Благодаря извѣстнымъ работамъ Фарадея, опубликованнымъ въ 1831 и 1832 году подъ заглавіемъ «Experimental researches on eletricity» (Опытныя изслѣдованія по электричеству), стали извѣстны взаимодѣйствія между токами и магнитами, а главное—узнали объ индуктированіи электродвижущей силы при перемѣщеніи проводника въ магнитномъ полѣ. На машинахъ Сименса съ двойнымъ T-образнымъ якоремъ (фиг. 76a и 76b) этотъ законъ нашелъ себѣ очень важныя примѣненія. Якорь этой машины состоялъ изъ желѣзнаго цилиндра, въ каналахъ котораго помѣщалась обмотка изъ изолированной мѣдной проволоки. Концы этой обмотки присоединялись къ двумъ изолированнымъ, насаженнымъ на продолженіи оси, контактнымъ или собирательнымъ кольцамъ, представленнымъ на фиг. 76a ради ясности одно надъ другимъ, а не рядомъ. По контактнымъ кольцамъ скользили двѣ неподвижно-закрѣпленныя пружины (щетки), которыя соединялись проводниками съ зажимами внѣшней цѣпи.

[1]) Объ обмоткѣ см. Арнольдъ: «Динамомашина постояннаго тока». Переводъ Г. Люста и Г. Фридберга, подъ ред. М. А. Шателена.

Если вращать этотъ желѣзный цилиндръ между полюсами стального магнита, то проволоки, помѣщенныя въ каналахъ, пересѣкутъ силовыя линіи и въ нихъ станутъ индуктироваться электродвижущія силы. На фиг. 76a индуктирующіяся стороны катушки, т. е. число проволокъ, принадлежащихъ къ одной группѣ, находятся какъ разъ противъ полюсовъ. По правилу Фарадея (статья 26) индуктируемая при данномъ вращеніи электродвижущая сила въ проволокахъ передъ сѣвернымъ полюсомъ направится за плоскость чертежа. Въ проволокахъ, расположенныхъ передъ южнымъ полюсомъ, одновременно индуктируется электродвижущая сила, направленная изъ-за плоскости чертежа къ намъ; поэтому электродвижущія силы, индуктируемыя въ обѣихъ частяхъ одного контура, сложатся. Равнымъ образомъ сложатся и всѣ электродвижущія силы всѣхъ отдѣльныхъ витковъ. Соединивъ между собою пружины или щетки



Фиг. 76a. Фиг. 76b.

снаружи проводникомъ (внѣшняя цѣпь), мы получимъ токъ, который передъ южнымъ полюсомъ направится изъ-за плоскости чертежа и войдетъ въ наружное собирательное кольцо. Скользящая по немъ щетка окажется такою, черезъ которую токъ выходитъ изъ машины; поэтому ее называютъ положительною. Дальше токъ пойдетъ черезъ внѣшнюю цѣпь, отсюда черезъ отрицательную щетку на внутреннее собирательное кольцо и оттуда дальше по направленію къ сѣверному полюсу.

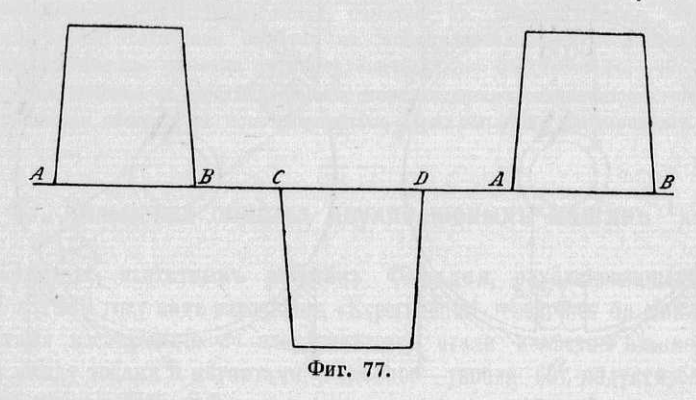
Исходящія изъ сѣвернаго полюса силовыя линіи, равномѣрно распредѣляясь, входятъ въ противолежащее желѣзо якоря, направляясь по нормалямъ къ нему, и напряженіе поля $\boldsymbol{H}$ въ междужелѣзномъ пространствѣ въ достаточной степени постоянно. За все время, пока индуктирующаяся часть

обмотки находится передъ дугой полюса, электродвижущая сила выражается равенствомъ (28), стр. 79:

$$E = H \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ,}$$

гдѣ подъ l надо разумѣть всю длину проводовъ въ сант., расположенныхъ передъ обоими полюсами, не принимая во вниманіе торцевыхъ соединеній, а подъ v окружную скорость въ сант. въ секунду.

При B индуктирующаяся часть обмотки I выходитъ изъ района полюса, электродвижущая сила достаточно быстро падаетъ до нуля и остается равною нулю, пока индуктирующаяся часть обмотки будетъ перемѣщаться въ пространствѣ между краями полюсовъ. При C индуктирующаяся часть обмотки I входитъ въ районъ южнаго полюса (фиг. 76b), въ ней тогда индуктируется электродвижущая сила, идущая изъ-за плоскости чертежа, и направленіе тока въ катушкѣ будетъ прямо противоположно предыдущему. Такъ какъ одновременно съ этимъ измѣняются знаки у щетокъ и

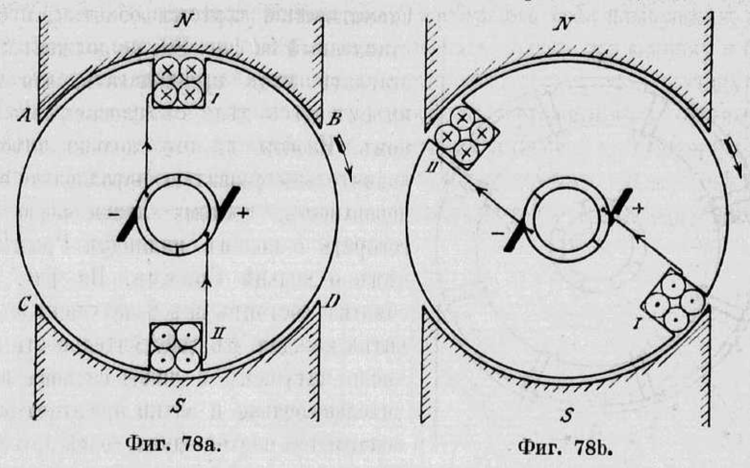


Фиг. 77.

направленіе тока во внѣшней цѣпи, то, слѣдовательно, машина будетъ давать **перемѣнный токъ**. Распредѣленіе его можно представить, нанося окружность $ABCD$ по оси абсциссъ, а электродвижущія силы, индуктирующіяся въ отдѣльныхъ точкахъ окружности, по оси ординатъ (фиг. 77). Раздѣливъ, затѣмъ, отдѣльныя электродвижущія силы на полное сопротивленіе всей цѣпи, мы получимъ токъ въ каждое мгновеніе. Такимъ образомъ для насъ ясно, что машина даетъ токъ перемѣнный по направленію, и кромѣ того еще прерывающійся, т. е. моментами совершенно прекращающійся.

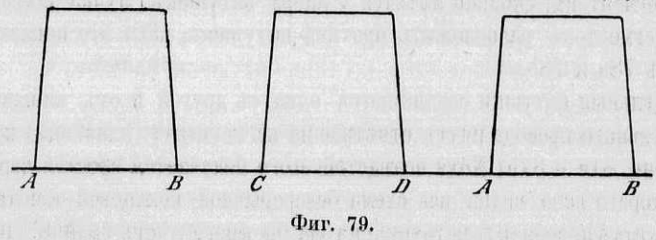
Въ позднѣйшихъ машинахъ концы обмотки (фиг. 78a и 78b) присоединялись къ двумъ изолированнымъ другъ отъ друга половинамъ одного и того же собирательнаго кольца. На фиг. 78a, въ силу направленія тока

въ проволокахъ, правая щетка оказывается положительною, такъ какъ черезъ нее токъ выходитъ изъ машины. Она остается положительною также и тогда, когда индуктирующаяся часть обмотки I входитъ въ предѣлы южнаго полюса и токъ въ индуктирующихся частяхъ обмотки (фиг. 78b) измѣняетъ свое направленіе. Щетки при этомъ должны нахо-



Фиг. 78a. Фиг. 78b.

диться въ нейтральномъ поясѣ, т. е. быть расположенными по діаметру, перпендикулярному къ силовымъ линіямъ, при чемъ предполагается, что изоляція, раздѣляющая собирательное кольцо на двѣ части, расположена въ плоскости витковъ обмотки. Тогда въ тотъ моментъ, когда произойдетъ перемѣна направленія тока внутри катушки, концы ея будутъ соеди-

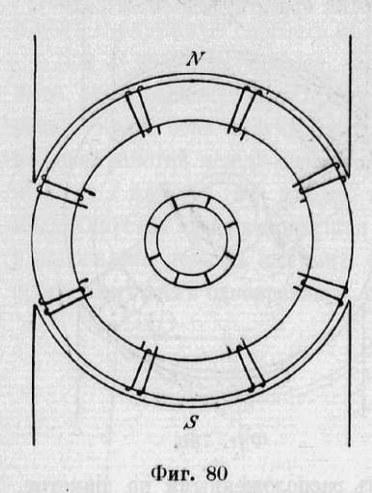


Фиг. 79.

няться уже съ другими щетками, т. е. съ другими зажимами внѣшней цѣпи. Поэтому направленіе тока во внѣшней цѣпи будетъ все время одно и то же, т. е. во внѣшней цѣпи вмѣсто перемѣннаго тока получаемъ **прерывистый постоянный токъ** (фиг. 79).

Для полученія во внѣшней цѣпи тока постояннаго не только по **направленію**, но и **по силѣ**, необходимо собирательное кольцо раздѣлить на нѣсколько частей, т. е. устроить **коммутаторъ съ большимъ чис-**

ломъ секцій. Впервые это было сдѣлано въ 1860 году Пачинотти, но въ то время на его изобрѣтеніе никто не обратилъ вниманія, и только позже это было вновь совершенно независимо устроено Граммомъ. Кольцо Грамма состоитъ изъ полаго желѣзнаго цилиндра съ непрерывной замкнутой кольцевой обмоткой изъ изолированной мѣдной проволоки (фиг. 80).



Фиг. 80

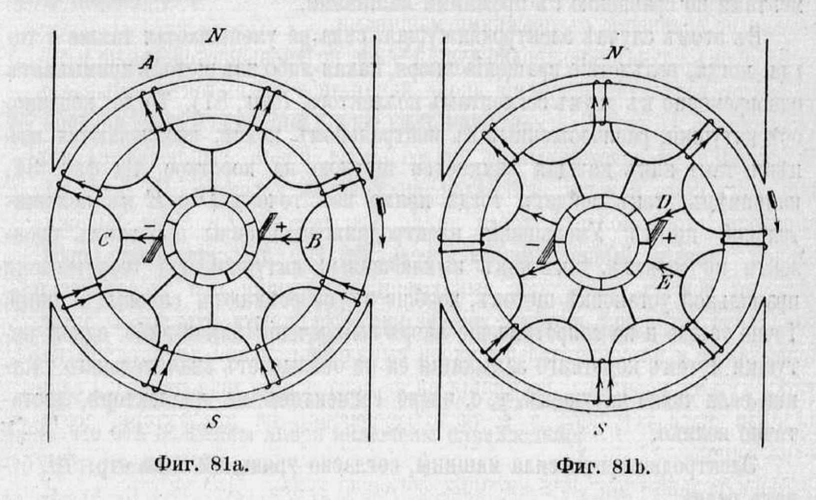
Схематическій чертежъ обмотки, представленный на фиг. 80, не долженъ заставлять насъ предполагать, что мы имѣемъ здѣсь дѣло съ плоскимъ кольцомъ. Наоборотъ, это кольцо имѣетъ значительно развитую параллельно оси поверхность; поэтому лучше было бы говорить о поломъ цилиндрѣ Грамма, чѣмъ о кольцѣ Грамма. На фиг. 80 обмотка состоитъ изъ 8 катушекъ въ 2 витка каждая. Въ дѣйствительности же число катушекъ и число витковъ значительно больше и витки при этомъ располагаются плотно одинъ возлѣ другого. Обмотки должны быть навиты всѣ въ одномъ направленіи.

На продолженіи оси находится состоящій изъ нѣсколькихъ секцій бронзовый или мѣдный коллекторъ или коммутаторъ. Послѣдній раздѣленъ плоскостями, параллельными оси, на столько изолированныхъ другъ отъ друга сегментовъ, сколько имѣется у якоря катушекъ. Лучше всего, изоляцію сегментовъ расположить противъ катушекъ, какъ это показано на чертежѣ 78а и 78b.

Отдѣльныя катушки соединяются одна съ другой и отъ каждаго соединительнаго провода идутъ отвѣтвленія къ сегменту (пластинѣ) коллектора (фиг. 81а и 81b). Хотя вслѣдствіе этого получается простой чертежъ, изъ котораго ясно видна вся схема безпрерывной кольцевой обмотки, но на практикѣ подобная конструкція имѣла бы много мѣстъ спайки. Поэтому отдаютъ предпочтеніе другому устройству обмотки, при которомъ концы катушекъ соединяются непосредственно съ сегментами коллектора и тамъ же происходитъ соединеніе съ началомъ рядомъ расположенной катушки. Коллекторный сегментъ служитъ, такимъ образомъ, соединеніемъ двухъ рядомъ расположенныхъ катушекъ.

Пусть теперь кольцо вращается между полюсами электромагнита; тогда проволоки обмотки станутъ пересѣкать силовыя линіи. Въ нихъ

будетъ индуктироваться электродвижущая сила, направленіе которой опредѣлится опять по правилу Фарадея. Такъ какъ силовыя линіи идутъ сквозь желѣзо кольца изъ сѣвернаго полюса въ южный, и почти совершенно отсутствуютъ въ воздушномъ пространствѣ внутри кольца, то пересѣченіе силовыхъ линій произойдетъ передъ полюсами со стороны внѣшней боковой поверхности кольца. Если вообразимъ себя плывущими, напримѣръ на фиг. 81а у точки A, отъ сѣвернаго полюса къ южному и будемъ смотрѣть въ сторону вращенія, то электродвижущая сила будетъ имѣть направленіе вправо отъ насъ, т. е. за плоскость чертежа. Вмѣсто обозначенія направленія тока въ обмоткѣ посредствомъ установки крестиковъ и точекъ на поперечныхъ разрѣзахъ проволокъ, мы можемъ это сдѣлать при помощи размѣщенія соотвѣтствующихъ стрѣлокъ на торцевыхъ соединеніяхъ.



Фиг. 81а. Фиг. 81b.

При вращеніи генератора вправо токъ въ торцевыхъ соединеніяхъ направляется къ сѣверному полюсу и удаляется отъ южнаго.

Но существованіе тока въ этихъ случаяхъ вообще зависитъ отъ того, предоставлена ли послѣднему возможность уходить во внѣшнюю цѣпь или нѣтъ. Стрѣлки на фиг. 81а указываютъ, что электродвижущая сила въ верхней и нижней половинахъ якоря направлена къ точкѣ B. Какъ будто у точки B встрѣчаются два давленія, которыя взаимно уничтожаютъ другъ друга и какъ бы уравновѣшиваются. При установкѣ при B и C щетокъ и при соединеніи ихъ другъ съ другомъ при помощи внѣшней цѣпи—токъ при B станетъ выходить изъ машины. Онъ пойдетъ тогда

черезъ внѣшнюю цѣпь и при C возвратится снова въ машину, чтобы затѣмъ черезъ обмотку по двумъ параллельнымъ путямъ снова придти къ B. Такимъ образомъ, щетка при B является положительною, а при C отрицательною. Щетки располагаются опять по діаметру, перпендикулярному къ силовымъ линіямъ, т. е. въ нейтральномъ поясѣ, при чемъ предполагается, что изоляція между сегментами коллектора находится какъ разъ противъ соотвѣтствующихъ катушекъ.

Если же число проводовъ на окружности якоря очень велико, то противъ полюсовъ находится всегда одно и то же число проволокъ, и электродвижущая сила практически можетъ считаться въ каждое мгновеніе постоянною. Такимъ образомъ, намъ теперь ясно то преимущество, которое получается въ кольцѣ Грамма съ коллекторомъ съ нѣсколькими сегментами по сравненію съ прежними машинами.

Въ этомъ случаѣ электродвижущая сила не уменьшается также и тогда, когда, вслѣдствіе вращенія якоря, какая-либо изъ щетокъ примыкаетъ одновременно къ двумъ сегментамъ коллектора (фиг. 81). Тогда, конечно, обѣ катушки, расположенныя въ нейтральномъ поясѣ, выключаются изъ цѣпи, такъ какъ каждая замкнется щеткою на короткое. На фиг. 81, напримѣръ, токъ пойдетъ тогда прямо изъ точекъ D и E къ положительной щеткѣ. Уменьшенія электродвижущей силы при этомъ произойти не можетъ, такъ какъ выключенныя катушки, при теоретически правильной установкѣ щетокъ, вообще не пересѣкаютъ силовыхъ линій. Точно также и на сопротивленіе якоря выключеніе какой-либо одной катушки путемъ короткаго замыканія ея не оказываетъ значительнаго вліянія, если число катушекъ, т. е. число сегментовъ на коллекторѣ, достаточно велико.

Электродвижущая сила машины, согласно уравн. (28) на стр. 79, будетъ равна

$$E = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{l} \cdot \boldsymbol{v} \cdot 10^{-8}.$$

Такъ какъ электродвижущія силы въ обѣихъ половинахъ якоря не складываются, а включены параллельно другъ другу, то l обозначаетъ въ этомъ случаѣ индуктирующуюся длину провода, приходящуюся противъ одного только полюса.

Пусть означаетъ:

$\boldsymbol{D}$ діаметръ якоря въ сант.,

$\boldsymbol{b}$ длину якоря въ сант.,

β уголъ обхвата якоря полюсами,

$\boldsymbol{N}$ силовой потокъ, исходящій изъ сѣвернаго полюса,

z число всѣхъ внѣшнихъ проводниковъ,

n число оборотовъ въ минуту,

тогда имѣемъ скорость v равною

$$v = \boldsymbol{D} \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}.$$

Число проводниковъ противъ одного полюса: $\frac{z \cdot \beta}{360}$.

Индуктирующаяся длина l проволокъ передъ однимъ полюсомъ тогда равна:

$$l = \frac{z \cdot \beta}{360} \cdot b.$$

Подставивъ эти значенія l и v въ выраженіе для E и принявъ магнитный потокъ N равнымъ произведенію напряженія поля H на поверхность полюса, т. е.

$$N = H \cdot D \cdot \frac{\pi \cdot \beta}{360} \cdot b,$$

мы получимъ электродвижущую силу машины:

$$E = N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8}.$$

Пусть, напримѣръ, $N = 3 \cdot 10^6$, $n = 1\,100$ и $z = 200$, тогда:

$$E = 3 \cdot 10^6 \cdot \frac{1\,100}{60} \cdot 200 \cdot 10^{-8} = 110 \text{ вольтъ}.$$

При опредѣленіи сопротивленія якоря w_a необходимо принять во вниманіе, что обѣ половины якоря включены параллельно.

Пусть, теперь означаютъ:

l всю длину намотанной проволоки въ мтр,

q поперечное сѣченіе проволоки въ мм²;

тогда сопротивленіе одной изъ обѣихъ вѣтвей равняется $\rho \cdot \frac{l/2}{q}$. Полное сопротивленіе обѣихъ параллельныхъ вѣтвей равно половинѣ послѣдняго; тогда при двухполюсной обмоткѣ имѣемъ:

$$w_a = \frac{\rho \cdot l/2}{2\,q} = \frac{\rho \cdot l}{4\,q}.$$

Удѣльное сопротивленіе ρ нагрѣтой мѣди можно при этомъ принимать равнымъ 0,02.

44. Барабанная обмотка двухполюсныхъ машинъ.

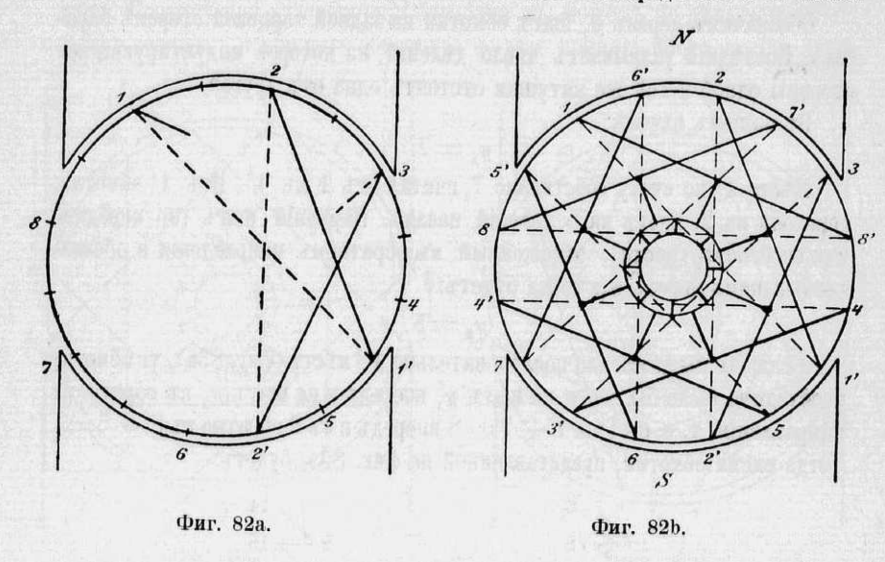
Разсмотрѣнный въ предыдущей статьѣ кольцевой якорь обладаетъ тѣмъ преимуществомъ, что у него очень простая обмотка, у которой, въ случаѣ надобности, можно исправлять любую катушку, не нуждаясь въ полной размоткѣ якоря. Напряженіе между двумя рядомъ расположенными проволоками представляетъ собою небольшую часть всего напряженія машины, благодаря чему у этого якоря сравнительно легко достигнуть достаточной изоляціи. Но у него имѣется и недостатокъ, состоящій въ томъ, что индуктируемыя внѣшнія проволоки малы по сравненію со всей длиной проволокъ. Слѣдовательно, сопротивленіе и вѣсъ обмотки будутъ сравнительно велики; поэтому кольцевая обмотка примѣняется теперь очень рѣдко. Если мы въ дальнѣйшемъ будемъ часто говорить о кольцевой обмоткѣ, то это только потому, что основныя положенія барабанной обмотки проще выясняются на простой кольцевой обмоткѣ.

Лучше использует проволоку изобрѣтенная въ 1872 г. барабанная обмотка Гефнера-Альтенека. При этой обмоткѣ проволока сперва укладывается передъ сѣвернымъ полюсомъ вдоль по боковой поверхности барабана и затѣмъ по торцевымъ частямъ барабана направляется къ діаметрально противоположному мѣсту у южнаго полюса. Каждая индуктирующаяся часть обмотки, расположенная передъ сѣвернымъ и южнымъ полюсами, принадлежитъ одной и той же катушкѣ. Конецъ первой катушки соединяется затѣмъ съ началомъ второй катушки, но при этомъ необходимо обращать вниманіе на то, чтобы обмотка располагалась равномѣрно по всей окружности якоря.

Для этого раздѣлимъ окружность якоря на нѣкоторое число частей (на фиг. 82a, напримѣръ, 8 частей) и точки дѣленія отмѣтимъ послѣдовательнымъ рядомъ цифръ 1, 2, 3 и т. д. Отмѣченныя такимъ образомъ точки представляютъ собою начало катушекъ. Проводимъ, теперь, проволоку у точки 1 по боковой поверхности спереди назадъ; сзади мы должны провести ее къ діаметрально противоположному мѣсту. Но такъ какъ послѣднее уже занято началомъ пятой катушки, то обозначенное пунктиромъ заднее соединеніе проводимъ изъ точки 1 въ точку 1′, расположенную вблизи точки 5. У точки 1′ мы идемъ затѣмъ по боковой поверхности сзади напередъ. Проволоки 1—1′ съ принадлежащими имъ соединеніями по торцамъ составятъ тогда одинъ витокъ. Изъ 1′ мы приходимъ по передней торцевой части снова въ 1 и наматываемъ катушку 1 — 1′, 1 — 1′, 1—1′ и т. д. до конца. Ради упрощенія, на фиг. 82a, каждая катушка со-

стоитъ изъ одного только витка. Но намъ ничто не мѣшаетъ предположить, что каждый витокъ представляетъ собою катушку, состоящую изъ нѣскольких оборотовъ проволоки.

Послѣ того какъ первая катушка уже готова, мы идемъ изъ 1′ по передней торцевой поверхности къ точкѣ 2, т. е. къ началу второй катушки. Снова проводимъ проволоку у точки 2 по боковой поверхности спереди назадъ и сзади должны перейти въ точку 6. Но такъ какъ точка 6 занята, то проводимъ проволоку по направленію пунктирной линіи къ точкѣ 2′ около точки 6. Изъ 2′ сзади обмотка идетъ напередъ къ 2 и послѣ



Фиг. 82a. Фиг. 82b.

приготовленія катушки 2 — 2′ приходимъ по передней поверхности къ 3 и т. д.

Теперь намъ остается, какъ это сдѣлано на фиг. 82b и слѣдующихъ, конецъ всей обмотки соединить съ началомъ ея и тѣмъ самымъ замкнуть обмотку на короткое. Кромѣ того необходимо еще соединить мѣста соединенія каждыхъ двухъ катушекъ съ соотвѣтствующимъ сегментомъ коллектора. При этомъ изоляцію каждыхъ двухъ сегментовъ мы обозначимъ на чертежѣ наиболѣе просто, именно противъ вершинъ правильнаго восьмиугольника, который образуется на передней торцевой части барабана соединительными проводниками. Отъ середины каждаго торцевого соединенія, связывающаго двѣ различныя катушки, идетъ проволока къ находящемуся вблизи сегменту.

Схему этой обмотки мы можемъ представить слѣдующимъ образомъ обозначая заднія торцевыя соединенія посредствомъ горизонтальной черты 1—1′ и т д., а переднія торцевыя соединенія наклонной чертой 1′—2 и т. д., т. е.

	8′			4′
1	1′		5	5′
2	2′		6	6′
3	3′		7	7′
4	4′		8	8′

Обозначимъ черезъ y_1 шагъ обмотки на задней торцевой сторонѣ барабана. Послѣдній указываетъ число дѣленій, на которое индуктирующіяся стороны одной и той же катушки отстоятъ одна отъ другой.

Въ нашемъ случаѣ:

$$y_1 = 7.$$

Мѣсто 1′ по счету собственно 7, считая отъ 1 къ 1′. Изъ 1′ обмотка, переходя въ 2, идетъ на 5 дѣленій назадъ. Передній шагъ (по передней торцевой поверхности), отложенный въ обратномъ направленіи и обозначаемый нами черезъ y_2, тогда будетъ:

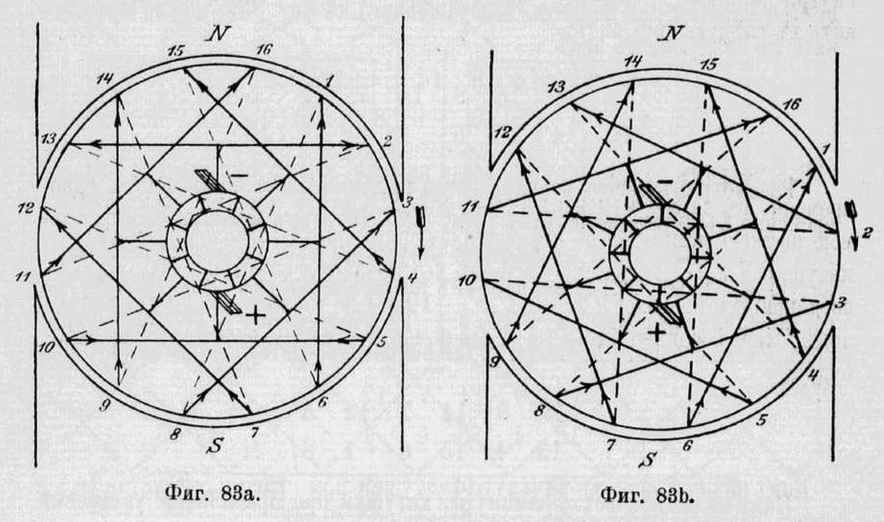
$$y_2 = 5.$$

Если бы мы намѣтили послѣдовательно 16 мѣстъ (фиг. 83a), то обмотку необходимо было бы вести на шагъ y_1 впередъ и на шагъ y_2 въ обратномъ направленіи, т. е. съ 1 на $1 + 7 = 8$ впередъ и съ 8 обратно въ $8 - 5 = 3$. Тогда схема обмотки, представленной на фиг. 83a, будетъ:

	6			14
1	8		9	16
3	10		11	2
5	12		13	4
7	14		15	6

Если отдѣльныя катушки состоятъ изъ многихъ витковъ, то торцевыя соединенія катушекъ, намотанныхъ послѣ, располагаются надъ торцевыми соединеніями прежде намотанныхъ и сопротивленія отдѣльныхъ катушекъ будутъ неодинаковыми. Этого избѣгаютъ тѣмъ, что катушки, намотанныя заранѣе на шаблонѣ, помѣщаютъ затѣмъ одну надъ другой. Благодаря этому достигаютъ хорошей изоляціи и болѣе легкой смѣны катушекъ. Поэтому шаблонная обмотка примѣняется теперь повсюду.

Очень полезно показать, что кольцевая и барабанная обмотки въ принципѣ тождественны, такъ какъ у обоихъ конецъ одной катушки присоединяется къ началу слѣдующей катушки. У барабанной обмотки начала нѣсколько раздвинуты, чтобы оставить мѣсто для концовъ. Тождественность между кольцомъ и барабаномъ станетъ еще очевиднѣе, если при разсмотрѣніи барабана концы катушекъ, т. е., напр., 1′, 2′ и т. д. на фиг. 82b, примемъ совершенно равнозначущими съ началами 1, 2, 3 и т. д., такъ какъ положеніе ихъ относительно полюса будетъ таково же, что и началъ. Электродвижущія силы въ двухъ соотвѣтствующихъ другъ другу индуктирующихся сторонахъ катушки можно считать въ каждый моментъ равными, если пренебречь незначительной диссимметріей расположенія послѣднихъ. Поэтому при разсмотрѣніи барабана мы можемъ не дѣлать различія между началомъ и концомъ обмотокъ, но зато принять число началъ двой-



Фиг. 83a. Фиг. 83b.

нымъ. Тогда мы тотчасъ же получимъ на внѣшней боковой поверхности барабана послѣдовательно включенныя одна за другой индуктирующіяся стороны катушекъ кольца.

Для опредѣленія направленія токовъ у барабаннаго якоря разсмотримъ сначала положеніе якоря, изображенное на фиг. 83a. Изъ предыдущей статьи мы знаемъ, что при вращеніи якоря вправо передъ сѣвернымъ полюсомъ токъ идетъ за плоскость чертежа, а передъ южнымъ—изъ-за плоскости чертежа. Слѣдовательно, стрѣлки, указывающія направленія тока и разставленныя на соединительныхъ проводахъ передней торцевой части барабана, должны быть направлены къ сѣверному полюсу и отъ южнаго полюса. Если, теперь, согласно этому разставить на переднихъ торцевыхъ

соединеніяхъ стрѣлки, то мы ясно увидимъ, что электродвижущія силы въ проволокахъ какъ одного контура, такъ и въ различныхъ контурахъ вообще складываются. Только въ соединеніи 5—10 онѣ сталкиваются, поэтому на соотвѣтствующемъ этому соединенію сегментѣ коллектора мы должны установить щетку. Изъ нея, если цѣпь замкнута, токъ уходитъ во внѣшнюю сѣть, и мы обозначимъ ее поэтому знакомъ +. Равнымъ образомъ на сегментѣ, примыкающемъ къ соединительному проводу 2—13, мы должны установить отрицательную щетку.

Какъ мы видимъ, токъ, возвращающійся изъ цѣпи въ машину, у отрицательной щетки развѣтвляется и идетъ далѣе по двумъ параллельнымъ вѣтвямъ къ положительной щеткѣ. Такимъ образомъ схему соединеній тока внутри машины для момента, изображеннаго на фиг. 83a, можно представить въ слѣдующемъ видѣ:

—	2	11	16	9	14	7	12	5	+
	13	4	15	6	1	8	3	10	

Разсмотримъ теперь случай, когда каждая щетка примыкаетъ одновременно къ двумъ сегментамъ (фиг. 83b). Въ этотъ моментъ отрицательною щеткою замкнутся на короткое катушки 2 и 11, а положительною— катушки 3 и 10, вслѣдствіе чего онѣ выключаются изъ цѣпи. Поэтому на соединеніяхъ проволокъ 2 — 11, 3 — 10 мы не ставимъ никакихъ стрѣлокъ. Схема соединеній тока тогда для момента, представленнаго на фиг. 83b, будетъ:

—	16	9	14	7	12	5	+
	13	4	15	6	1	8	

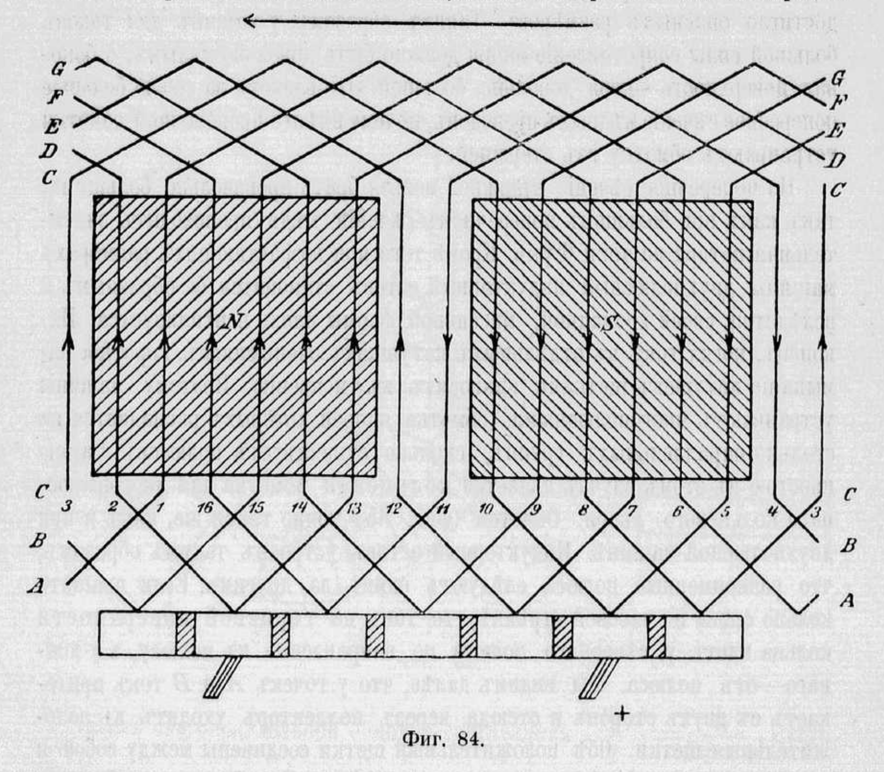
Какъ видимъ, коротко-замкнутыя катушки при правильной установкѣ щетокъ располагаются снова въ нейтральномъ поясѣ.

Развернемъ, теперь, боковую поверхность якоря; тогда получимъ наглядную картину прохожденія тока. На фиг. 84 развертка боковой поверхности якоря соотвѣтствуетъ какъ разъ моменту, представленному на фиг. 83a, когда щетки примыкаютъ только къ одному сегменту. При этомъ предполагаютъ, что обмотка якоря перемѣщается по направленію верхней стрѣлки передъ неподвижными полюсами N и S, при чемъ коллекторъ скользитъ по обѣимъ щеткамъ. При поворотѣ на $^1/_{16}$ обѣ щетки одновременно примкнутъ каждая къ двумъ сегментамъ и потому замкнутъ на короткое катушки, находящіяся въ нейтральномъ поясѣ.

Если, теперь, наложимъ фиг. 84 на боковую поверхность барабана, то получимъ обмотку, всѣ части которой будутъ лежать въ одной цилиндри-

ческой поверхности, торцевыя соединенія, расположенныя прежде на лобовыхъ частяхъ барабана, будутъ находиться теперь на боковой поверхности барабана, при чемъ коллекторъ будетъ имѣть тотъ же діаметръ, что и якорь.

Электродвижущая сила барабаннаго якоря должна быть такою же, какъ и въ кольцевомъ якорѣ, съ тѣмъ же числомъ внѣшнихъ проволокъ. Теперь мы видимъ, насколько удобно въ выраженіе для электродви-



Фиг. 84.

жущей силы барабаннаго и кольцевого якоря вводить не число витковъ, а число внѣшнихъ проволокъ z. Такимъ образомъ и для двухполюсной барабанной обмотки мы имѣемъ:

$$E = N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8}.$$

Выраженіе для сопротивленія якоря, очевидно, для кольца и для барабана будетъ одинаково.

45. Кольцевой якорь съ параллельной обмоткой.

Мы уже раньше указывали, что электродвижущую силу машины надо считать за главную величину, которая опредѣляется конструкцiей машины и числомъ оборотовъ. Сила тока, которую можно получить отъ машины, зависитъ всецѣло отъ воли потребителя, но она не должна превышать извѣстной нормы, чтобы тѣмъ самымъ тепло Джоуля въ якорѣ не достигло опасныхъ размѣровъ. Такимъ образомъ, у машинъ для токовъ большой силы сопротивленiе якоря должно быть довольно малымъ, а боковая поверхность якоря довольно большой. Это влечетъ за собою большое поперечное сѣченiе мѣдныхъ проводовъ, почему вмѣсто проволочной обмотки устраиваютъ обмотку изъ стержней.

Но поперечное сѣченiе стержней нельзя брать произвольно большимъ, такъ какъ при большомъ поперечномъ сѣченiи мѣди происходитъ значительная потеря на токи Фуко. Кромѣ того при возрастающихъ размѣрахъ машины двухполюсный индукторный остовъ становится безобразнымъ и вслѣдствiе своей громадной, массивной формы плохо вентилируется. Наконецъ, когда токъ въ отдѣльныхъ катушкахъ очень силенъ, короткое замыканiе катушекъ щетками приводитъ къ искренiю. Поэтому машины устраиваютъ многополюсными, обмотка якорей которыхъ распадается на столько параллельныхъ группъ, сколько существуетъ полюсовъ. Самою простою въ этомъ случаѣ является кольцевая обмотка для многополюснаго кольцевого якоря. Обмотка (фиг. 85) точно такая же, какъ и при двухполюсной машинѣ. Индукторный остовъ устроенъ такимъ образомъ, что разноименные полюса слѣдуютъ одинъ за другимъ. Если вращать кольцо снова по часовой стрѣлкѣ, то токъ на торцевой поверхности кольца идетъ у сѣвернаго полюса по направленiю къ полюсу, а у южнаго—отъ полюса. Мы видимъ далѣе, что у точекъ A и B токъ притекаетъ съ двухъ сторонъ и отсюда черезъ коллекторъ уходитъ въ положительныя щетки. Обѣ положительныя щетки соединены между собою и съ положительнымъ зажимомъ внѣшней цѣпи. Подобнымъ же образомъ соединены и двѣ отрицательныя щетки между собою и съ отрицательнымъ зажимомъ внѣшней цѣпи.

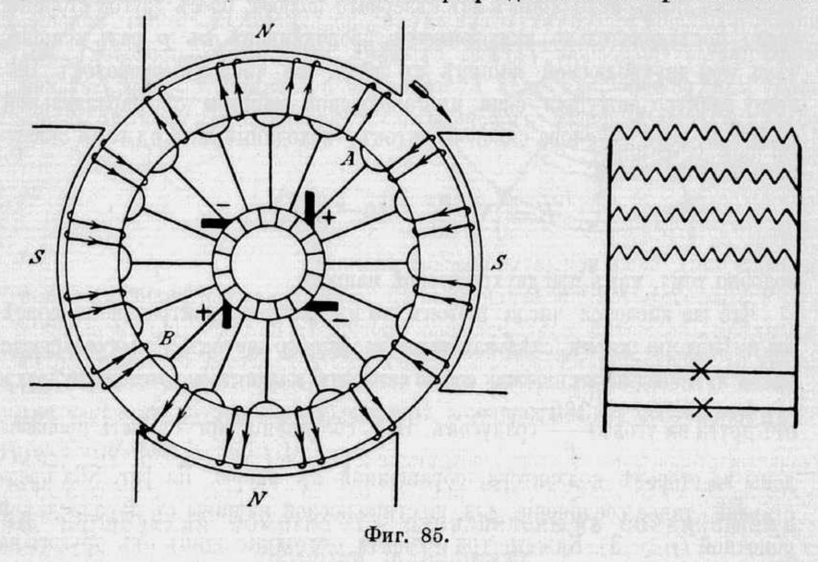
Какъ видимъ, якорь распадается на четыре параллельно включенныя группы. Пусть:

l полная длина намотанной проволоки въ мтр,
p число паръ полюсовъ,
q поперечное сѣченiе проволоки въ мм^2,

тогда сопротивленiе группы, заключенной между двумя разноименными щетками, будетъ $\frac{\rho \cdot l/2p}{q}$. Полное сопротивленiе якоря при $2p$ параллельныхъ вѣтвяхъ въ $2p$ раза меньше; тогда имѣемъ:

$$w_a = \frac{\rho \cdot l}{4p^2 \cdot q}.$$

Слѣдовательно, параллельная обмотка имѣетъ то преимущество, что при ней сопротивленiе якоря очень незначительно. Равнымъ образомъ плотность тока, т. е. число амперъ на мм^2, въ отдѣльныхъ проволокахъ довольно мала, такъ какъ весь токъ якоря раздѣляется на $2p$ частей. Эта



Фиг. 85.

плотность при параллельной обмоткѣ составляетъ $\frac{i_a/2p}{q} = \frac{i_a}{2p \cdot q}$. Пусть, напримѣръ, у машины на 110 вольтъ и на 110 амперъ силы тока въ якорѣ вся длина намотанной проволоки равна 200 мтр, поперечное сѣченiе проволоки 10 мм^2 и число полюсовъ 4, т. е. $p = 2$, тогда имѣемъ:

$$w_a = \frac{\rho \cdot l}{4p^2 \cdot q} = \frac{0{,}02 \cdot 200}{4 \cdot 4 \cdot 100} = 0{,}025.$$

Потеря энергiи на тепло Джоуля:

$$i_a^2 \cdot w_a = 100^2 \cdot 0{,}025 = 250 \text{ ватть}.$$

т. е. около 2,5% всей мощности. Потеря же напряженія въ якорѣ составляетъ:

$$i_a\, w_a = 100 \cdot 0{,}025 = 2{,}5 \text{ вольта},$$

и плотность тока:

$$\frac{i_a}{2p \cdot q} = \frac{100}{4 \cdot 10} = 2{,}5 \frac{\text{амп}}{\text{мм}^2}.$$

Для опредѣленія электродвижущей силы въ якорѣ съ параллельной обмоткой необходимо обратить вниманіе на то, что хотя съ одной стороны число пересѣченій силовыхъ линій на проводникъ и за одинъ оборотъ въ p разъ больше, чѣмъ при двухполюсной машинѣ съ тѣмъ же числомъ силовыхъ линій, исходящихъ изъ сѣвернаго полюса, но съ другой стороны число послѣдовательно включенныхъ проводниковъ въ p разъ меньше, чѣмъ при двухполюсной машинѣ съ тѣмъ же числомъ проволокъ. Поэтому электродвижущая сила многополюсной машины съ параллельной обмоткой, если N снова силовой потокъ, исходящій изъ одного сѣвернаго полюса, равна:

$$E = N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ},$$

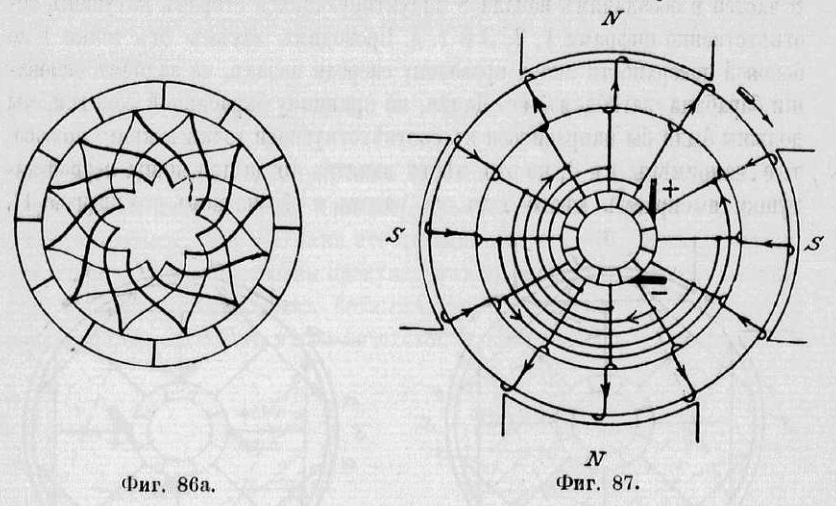
подобно тому, какъ при двухполюсной машинѣ.

Что же касается числа щетокъ, то въ каждомъ нейтральномъ поясѣ мы имѣемъ по щеткѣ, слѣдовательно вообще $2p$ щетокъ. Для уменьшенія числа ихъ соединяютъ между собою сегменты коллектора, отстоящіе другъ отъ друга на уголъ $\frac{360}{p}$ градусовъ. Эти соединенія могутъ быть произведены на сторонѣ коллектора, обращенной къ якорю. На фиг. 86а представлено такое соединеніе для шестиполюсной машины съ параллельной обмоткой ($p = 3$). Каждые три сегмента, отстоящіе одинъ отъ другого на $\frac{360}{3} = 120°$, являются соединенными между собою и какъ бы замѣняютъ то соединеніе, которое должно было бы быть сдѣлано между одноименными щетками. Если расположить въ разныхъ плоскостяхъ жирно очерченныя и тонко очерченныя соединенія, сдѣланныя въ видѣ лентъ, то можно избѣжать соприкосновенія ихъ между собою.

Конечно, соединеніе производятъ не только тѣхъ трехъ сегментовъ, къ которымъ какъ разъ прилегаютъ щетки, но и всѣхъ другихъ сегментовъ въ такомъ же порядкѣ—по три. Только въ томъ соединеніи, къ которому непосредственно примыкаютъ щетки, будетъ токъ; во всѣхъ же остальныхъ его не будетъ, такъ какъ точки будутъ имѣть одинаковые по-

тенціалы. Это становится еще яснѣе благодаря фиг. 87, гдѣ равнопотенціальныя соединенія (соединенія Мордея) подходятъ непосредственно къ проволокамъ, ведущимъ къ коллектору.

Уменьшеніе числа щетокъ, понятно, допустимо только тамъ, гдѣ плотность тока подъ щетками невелика. Соединенія Мордея имѣютъ



Фиг. 86а. Фиг. 87.

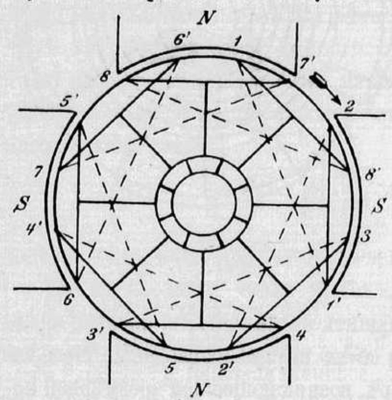
своею цѣлью вообще не столько уменьшить число щетокъ, сколько сравнять неравномѣрность распредѣленія тока внутри якоря, дабы тѣмъ самымъ устранить искреніе на коллекторѣ, возникающее при чрезмѣрной нагрузкѣ отдѣльныхъ щетокъ.

46. Барабанная обмотка съ параллельнымъ соединеніемъ (обмотка шлейфомъ).

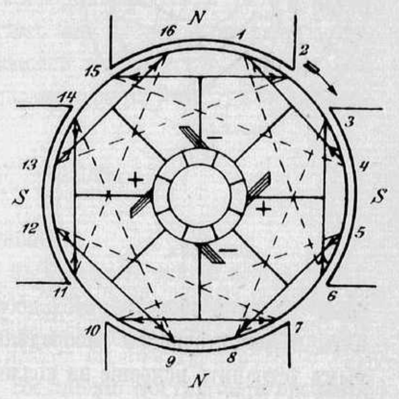
При многополюсной обмоткѣ шлейфомъ проводникъ, расположенный передъ сѣвернымъ полюсомъ, соединяютъ послѣдовательно непосредственно съ соотвѣтствующимъ ему проводникомъ передъ ближайшимъ южнымъ полюсомъ. Послѣ окончанія обмотки данной катушки возвращаются обратно почти къ начальной точкѣ и начинаютъ вторую катушку. Если мысленно отбросить проволоку передъ южнымъ полюсомъ, то замѣтимъ принципіальное сходство кольцевой обмотки съ обмоткой барабанной. Отсюда же ясно, что обмотка шлейфомъ, подобно кольцевой обмоткѣ, приводитъ къ параллельному соединенію. Разсмотримъ сначала:

a) Длинную обмотку шлейфомъ.

Въ этомъ случаѣ ширина катушки должна занимать по крайней мѣрѣ полное полюсное дѣленіе. Пусть, напримѣръ, число полюсовъ будетъ 4, число катушекъ 8. Поэтому окружность якоря раздѣлимъ на фиг. 88a на 8 частей и обозначимъ начала 8 индуктирующихся сторонъ катушекъ соотвѣтственно цифрами 1, 2, 3 и т. д. Проводимъ затѣмъ отъ точки 1 по боковой поверхности якоря проволоку спереди назадъ, на заднемъ основаніи барабана загибаемъ ее. Далѣе, по принципу барабанной обмотки, мы должны были бы направиться къ соотвѣтствующей точкѣ южнаго полюса, т. е. напримѣръ, къ 3, но это мѣсто занято; тогда для конца первой катушки выбираемъ мѣсто тутъ же рядомъ и обозначаемъ его цифрою 1'.



Фиг. 88a. Барабанная обмотка шлейфомъ. Длинный шагъ обмотки.



Фиг. 88b. Барабанная обмотка шлейфомъ. Длинный шагъ обмотки съ послѣдовательной нумераціей.

Закончивъ обмотку катушки 1—1', приключаемъ ее къ слѣдующей катушкѣ. Начало второй катушки мѣсто 2; поэтому на переднемъ основаніи барабана мы должны точку 1' соединить съ 2. Подобнымъ образомъ мы идемъ дальше и въ концѣ замыкаемъ обмотку на себя. Мѣста соединенія двухъ смежныхъ катушекъ, какъ, напримѣръ, соединенія 1'—2, приключаются къ коллектору. Соотвѣтственно 8 катушкамъ на коллекторѣ находится 8 сегментовъ.

Шагъ обмотки отъ 1 къ 1' въ этомъ случаѣ равенъ 5, шагъ отъ 1' въ обратномъ направленіи къ 2 равенъ 3. Обозначая, такимъ образомъ, снова черезъ y_1 шагъ на задней сторонѣ по направленію впередъ и черезъ y_2 шагъ на передней сторонѣ въ обратномъ направленіи, имѣемъ:

$$y_1 = 5, \qquad y_2 = 3.$$

Если вообще имѣется p паръ полюсовъ, т. е. $2p$ полюсовъ, то теоретически надо передвинуться дальше на $2p$-ую часть окружности якоря, на самомъ же дѣлѣ шагъ долженъ быть нѣсколько больше или меньше, чѣмъ $2p$-ая доля окружности якоря. Пусть s обозначаетъ число отложенныхъ на окружности якоря мѣстъ или число индуктирующихся сторонъ катушекъ, тогда при длинной обмоткѣ шлейфомъ для шага получаемъ слѣдующее выраженіе:

$$y_1 = \frac{s}{2p} + 1 \qquad y_2 = \frac{s}{2p} - 1.$$

При этомъ s должно быть кратнымъ $2p$, чтобы y_1 и y_2 были цѣлыми числами; кромѣ того y_1 и y_2 должны быть числами нечетными. Послѣднее станетъ яснымъ, если мы, какъ это сдѣлано на фиг. 88b, мѣста на окружности якоря послѣдовательно пронумеруемъ и составимъ таблицу обмотки. Если бы шагъ обмотки былъ четнымъ, то, начавъ съ 1, мы постоянно приходили бы только въ мѣста нечетныя, и обмотка была бы замкнутой и

```
     4            12
1    6       9    14
3    8      11    16
5   10      13     2
7   12      15     4
```

не содержащей совершенно четныхъ мѣстъ, которыя тогда въ свою очередь составляли бы отдѣльныя обмотки. Къ такимъ многократно замкнутымъ обмоткамъ прибѣгаютъ лишь въ тѣхъ случаяхъ, когда инымъ способомъ невозможно достичь необходимой симметріи въ расположеніи проволокъ обмотки.

Примѣняя правило Фарадея, опять получаемъ, что токъ въ проволокахъ на переднемъ основаніи барабана при обозначенномъ вращеніи якоря идетъ къ сѣверному полюсу и уходитъ отъ южнаго. Для фиг. 88b мы получаемъ тогда слѣдующую схему соединеній тока:

	7	12	9	14	
	10	5	8	3	
−	2	13	16	11	+
	15	4	1	6	

Фиг. 88a и 88b относятся, главнымъ образомъ, къ гладкому якорю или къ зубчатому, въ каждомъ каналѣ котораго располагается индуктирующаяся сторона одной только катушки. Гладкіе якоря за послѣднее

время почти совсѣмъ не примѣняются, такъ какъ на ихъ поверхности можно размѣстить только ограниченное число проволокъ. Кромѣ того установка въ каналахъ катушекъ, изготовленныхъ по шаблону, при массовомъ производствѣ обходится дешевле, чѣмъ обмотка гладкаго якоря. Наконецъ, согласно статьѣ 36, у зубчатыхъ якорей токи Фуко совершенно отсутствуютъ въ мѣди якоря. Поэтому всѣ новѣйшія машины снабжаютъ зубчатыми якорями, при чемъ въ каждомъ каналѣ послѣднихъ располагаютъ стороны нѣсколькихъ катушекъ. Само собою понятно, что обмотка, представленная на фиг. 88b и данный для нея шагъ годятся и для зубчатаго якоря. Такъ, напримѣръ, при помѣщеніи въ каждомъ каналѣ сторонъ двухъ катушекъ необходимо индуктирующуюся сторону второй катушки помѣщать не рядомъ, а подъ стороной первой катушки, и при расчетѣ шага обмотки необходимо принимать во вниманіе и помѣщенную снизу сторону второй катушки. Это условіе также примѣняется при расположеніи индуктирующихся сторонъ нѣсколькихъ катушекъ въ одномъ каналѣ, которыя обычно укладываются въ видѣ двухъ пучковъ одинъ надъ другимъ.

Проще опредѣлить можно шагъ обмотки при расположеніи индуктирующихся сторонъ двухъ катушекъ въ каждомъ каналѣ, отсчитывая не число катушекъ, а число каналовъ. При этомъ, понятно, предполагаютъ, что изъ двухъ индуктирующихся сторонъ одной и той же катушки, напримѣръ, 1 и 1′, фиг. 89, одна располагается сверху, а другая снизу. При расположеніи индуктирующихся сторонъ одной надъ другой шагъ обмотки, отнесенный къ индуктирующимся сторонамъ, всегда будетъ нечетнымъ числомъ. Поэтому при такого рода обмоткѣ не нужно опредѣлять собственно шага ея, а слѣдуетъ просто перемѣститься впередъ на такое число каналовъ, чтобы достигнуть соотвѣтствующаго мѣста близрасположеннаго полюса. Шагъ, въ этомъ случаѣ «число отсчитываемыхъ каналовъ», равняется полюсному дѣленію. Послѣ окончанія обмотки катушки 1—1′ возвращаются къ каналу 2, сосѣднему съ началомъ катушки, и т. д. Такая обмотка представлена на фиг. 89 для 4 полюсовъ и 12 каналовъ. Сравнивая, мы видимъ, что фиг. 89 и 88a сходны въ принципѣ и по обозначенію между собою. Заднія соединенія для ясности вынесены на чертежѣ наружу по окружности якоря.

b) Короткая обмотка шлейфомъ.

Ширина катушки въ этомъ случаѣ можетъ не занимать цѣлаго полюснаго дѣленія. Шагъ обмотки здѣсь можно выбрать короче, и мы получаемъ обмотку Свинбурна. Для обмотки на гладкомъ якорѣ шаги, отнесенные къ послѣдовательно номерованнымъ индуктирующимся сторонамъ, опредѣляются по формуламъ:

$$y_1 = \frac{s - b}{2p} + 1 \qquad y_2 = \frac{s - b}{2p} - 1.$$

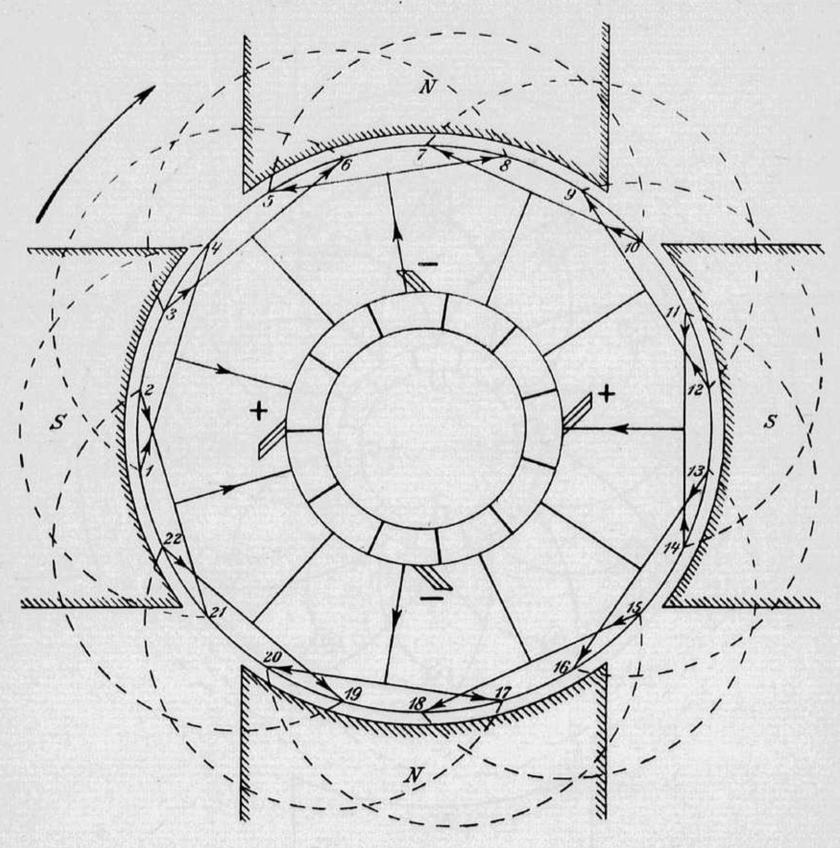
Фиг. 89. Барабанная обмотка шлейфомъ.

при чемъ b любое число, удовлетворяющее только условію, что y_1 и y_2 нечетныя числа. Пусть, напримѣръ, $s = 22$, $p = 2$ и $b = 6$, тогда получаемъ обмотку, представленную на фиг. 90. У нея

$$y_1 = 5 \text{ и } y_2 = 3.$$

Положеніе щетокъ опредѣлится тотчасъ же, какъ мы нанесемъ на проводахъ передъ полюсами стрѣлки, указывающія направленіе тока. Тогда

мы увидимъ, что изъ провода 11—14 токъ идетъ въ правую щетку. Ее обозначимъ знакомъ $+$ и остальныя щетки размѣстимъ подъ углами къ ней въ $\frac{360}{2p}$ градусовъ. Лѣвая щетка при этомъ замыкаетъ на корот-

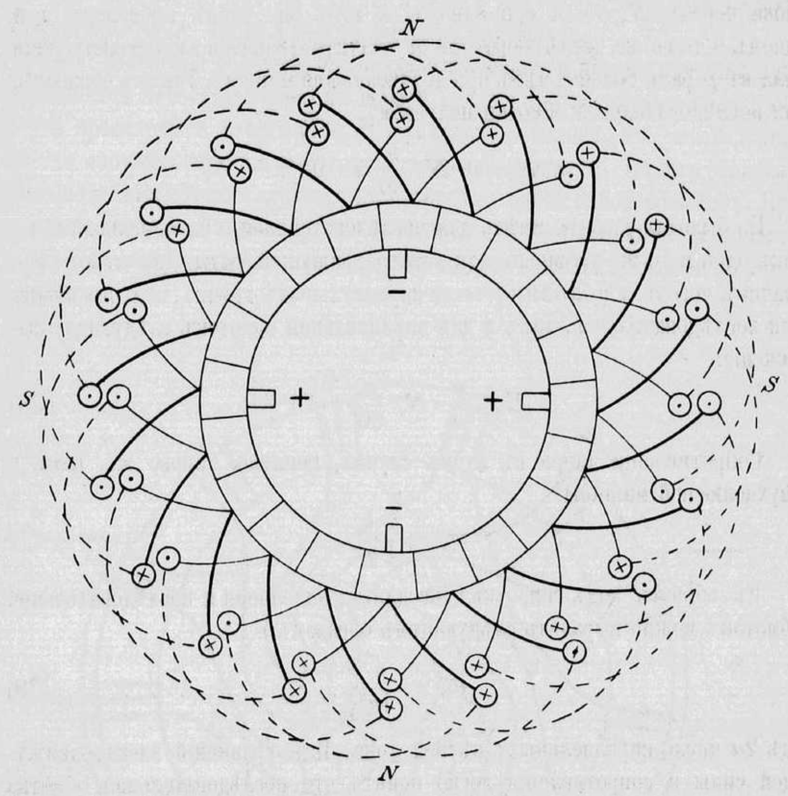


Фиг. 90. Барабанная обмотка шлейфомъ съ укороченнымъ шагомъ обмотки.

кое катушки 21, 4, которыя находятся какъ разъ въ нейтральномъ поясѣ. Тогда получается слѣдующая схема соединенія тока:

	5	10	7	12	9	14	
	8	3	6	1			
−	20	15	18	13	16	11	+
	17	22	19	2			

Особенно просто это будетъ опять при обмоткахъ зубчатыхъ якорей фиг. 91. Въ этомъ случаѣ опять совершенно не требуется опредѣленіе шага обмотки, нужно только выполнить основное правило: одна изъ обѣихъ индуктирующихся сторонъ катушки должна занимать верхнее положеніе, а другая нижнее. Для числа каналовъ $Z = 20$ при 4-хъ-полюсной обмоткѣ мы получимъ шагъ, направленный впередъ на задней сторонѣ, равнымъ 5, и шагъ



Фиг. 91. Барабанная обмотка шлейфомъ съ укороченнымъ шагомъ обмотки.

на передней сторонѣ въ обратномъ направленіи равнымъ 4. Примемъ вмѣсто этого укороченные шаги $Y_1 = 3$ и $Y_2 = 2$; тогда получимъ обмотку фиг. 91. О вліяніи укороченія шага обмотки на реакцію якоря см. ст. 54. У машинъ съ добавочными полюсами одинъ витокъ долженъ занимать по возможности полное полюсное дѣленіе, слѣдовательно, обмотка по хордамъ въ данномъ случаѣ является пригодной.

47. Кольцевая обмотка съ послѣдовательнымъ соединенiемъ.

Послѣдовательная обмотка якоря многополюсной машины распадается, подобно обмоткѣ якоря двухполюсной машины, на двѣ параллельныя группы. Обозначимъ магнитный потокъ, исходящiй изъ сѣвернаго полюса, снова черезъ $\boldsymbol{N}$; тогда при одномъ и томъ же числѣ проволокъ z и одномъ и томъ же числѣ оборотовъ n индуктирующаяся электродвижущая сила въ p разъ больше, чѣмъ при двухполюсной машинѣ. Такимъ образомъ, для послѣдовательной обмотки получаемъ:

$$E = p \cdot \boldsymbol{N} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \,.\, 10^{-8}.$$

Но было бы удобнѣе имѣть для послѣдовательной и параллельной обмотокъ одно и то же уравненiе для электродвижущей силы. Для этого, обозначивъ черезъ a половину числа параллельныхъ группъ, получимъ какъ для послѣдовательной, такъ и для параллельной обмотокъ слѣдующее выраженiе:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \boldsymbol{N} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (38)$$

Сопротивленiе якоря въ этомъ случаѣ, понятно, таково же, какъ у двухполюсной машины:

$$w_a = \frac{\rho \cdot l}{4\,q},$$

Въ общемъ видѣ сопротивленiе для параллельной и послѣдовательной обмотокъ можно выразить слѣдующимъ образомъ:

$$w_a = \frac{\rho \cdot l}{4a^2 q}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (39)$$

гдѣ $2a$ число параллельныхъ вѣтвей тока. Изъ уравненiй электродвижущей силы и сопротивленiя легко понять, что послѣдовательная обмотка пригодна для машинъ высокаго напряженiя и для небольшой силы тока.

Принципъ послѣдовательно-кольцевой обмотки состоитъ въ слѣдующемъ: за катушкой, расположенной передъ сѣвернымъ полюсомъ, включается почти подобно же расположенная катушка ближайшаго сѣвернаго полюса, которая соединяется съ катушками послѣдующихъ сѣверныхъ полюсовъ. У этой обмотки имѣется шагъ только впередъ, а не впередъ и обратно. Послѣ p шаговъ каждый въ y индуктирующихся сторонъ обходятъ уже одинъ разъ кольцо вокругъ и приходятъ въ мѣсто $s \pm 1$,

сосѣднее съ начальнымъ. Отсюда для послѣдовательной обмотки гладкаго кольца имѣемъ:

$$p\,y = s \pm 1$$

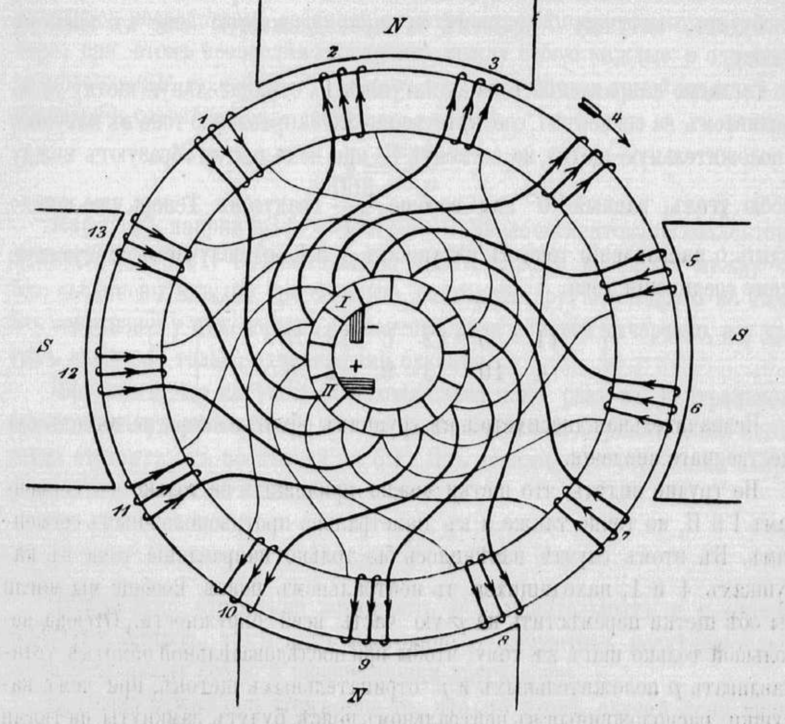
или

$$y = \frac{s \pm 1}{p}.$$

Для замкнутой обмотки въ одинъ слой y и s необходимо должны быть взаимнопростыми. Число s иногда бываетъ нечетнымъ.

При кольцевой обмоткѣ двухполюсныхъ машинъ вторая катушка присоединяется непосредственно къ первой и т. д. При послѣдовательной обмоткѣ происходитъ то же самое, съ тою только разницею, что между включаются соотвѣтствующiя катушки остальныхъ полюсовъ. Такимъ образомъ многополюсная обмотка сводится къ простой съ одной парой полюсовъ. При каждомъ полномъ обходѣ вокругъ обмотка какъ бы скользитъ впередъ на шагъ.

Между двумя сосѣдними сегментами, такимъ образомъ, включено p катушекъ.



Фиг. 92. Кольцевой якорь съ послѣдовательной обмоткой.

Напримѣръ, $p = 2$ и $s = 13$, тогда $y = 7$ или 6. На фиг. 92 принято y равнымъ 6. На данномъ чертежѣ начала катушекъ берутся отъ пластинъ коллектора и идутъ вдоль по лицевой поверхности якоря, концы же послѣднихъ, располагаясь по внутренней боковой поверхности, идутъ изъ-за плоскости чертежа и примыкаютъ снова къ коллектору. Каждый коллекторный сегментъ является опять мѣстомъ соединенія двухъ катушекъ, и схема соединеній будетъ:

1	— 7		11	— 4
13	⟋ 6		10	⟋ 3
12	⟋ 5		9	⟋ 2
11	⟋		8	— 1

Разставимъ извѣстнымъ уже намъ образомъ на проволокахъ лицевой поверхности стрѣлки. Такъ какъ въ катушкахъ 1 и 4 совершенно не индуктируется электродвижущей силы, то пока стрѣлокъ тамъ не поставимъ. Во всѣхъ же остальныхъ катушкахъ сомнѣній о направленіи тока у насъ не будетъ; катушку 7 примемъ за принадлежащую еще къ южному полюсу.

Согласно направленію тока въ катушкѣ 11 отрицательную щетку устанавливаемъ на сегментѣ I, соотвѣтственно же направленію тока въ катушкѣ 8 положительную щетку на сегментѣ II, при чемъ щетки образуютъ между собою уголъ, равный 90° или вообще $\frac{360}{2p}$ градусовъ. Теперь уже можно судить о направленіи тока въ катушкахъ 1 и 4, мы получаемъ слѣдующую схему соединеній тока:

—	11	5	12	6	13	7	1	+
	4	10	3	9	2	8		

Незначительная диссиметрія въ группахъ обмотки якоря не имѣетъ существеннаго значенія.

Не трудно видѣть, что щетки можно приложить не только къ сегментамъ I и II, но точно также и къ діаметрально противоположнымъ сегментамъ. Въ этомъ случаѣ измѣнилось бы только направленіе тока въ катушкахъ 4 и 1, находящихся въ нейтральномъ поясѣ. Вообще мы могли бы обѣ щетки перемѣстить на p-ую часть всей окружности. Отсюда небольшой только шагъ къ тому, чтобы при послѣдовательной обмоткѣ устанавливать p положительныхъ и p отрицательныхъ щетокъ, при чемъ катушки, расположенныя въ нейтральномъ поясѣ, будутъ замкнуты щетками

на короткое. Но при послѣдовательной обмоткѣ обыкновенно обходятся только двумя щетками.

Нѣсколько мгновеній спустя послѣ момента, представленнаго на фиг. 92, положительная щетка расположится одновременно на двухъ сегментахъ, и вслѣдствіе этого замкнетъ на короткое соединенныя послѣдовательно катушки 1 и 7. Такъ какъ, согласно основному принципу послѣдовательной кольцевой обмотки, послѣ p шаговъ снова приходятъ въ мѣсто, сосѣднее съ исходной точкой, то вообще между двумя сосѣдними сегментами помѣщаются p катушекъ, и онѣ въ то время, когда щетки прикасаются одновременно къ двумъ сегментамъ, замкнуты въ послѣдовательной цѣпи на короткое.

Если же желаютъ всегда имѣть только одну катушку замкнутой на короткое, то число сегментовъ дѣлаютъ въ p разъ больше числа катушекъ. Тогда число катушекъ можно выбрать относительно меньше. Начало катушекъ и концы ихъ присоединяются въ этомъ случаѣ каждый къ отдѣльному сегменту коллектора. Соединеніе катушекъ между собою производится посредствомъ соединенія соотвѣтствующихъ сегментовъ коллектора; при этомъ необходимо соединять между собою каждые p одинаково расположенные сегменты. Результатъ тогда получается такой же, какъ при соединеніи соотвѣтственно шагу:

$$y = \frac{s \pm 1}{p}.$$

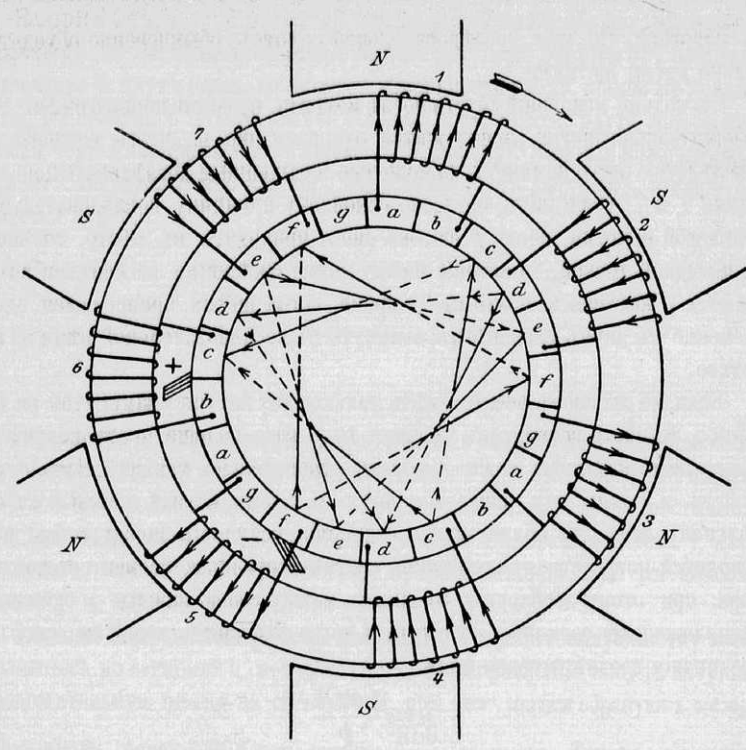
На фиг. 93, напримѣръ, $s = 7$ и $p = 3$. Число сегментовъ на коллекторѣ, слѣдовательно, 21. Соотвѣтственно тремъ парамъ полюсовъ между собою соединены каждые три сегмента, отстоящіе другъ отъ друга на 120°. Это соединеніе у нѣкоторыхъ сегментовъ ради ясности вычерчено, а у другихъ намѣчено только одинаковыми буквами.

Положимъ, что катушка 6, находящаяся какъ разъ въ нейтральномъ поясѣ, замкнута на короткое положительной щеткой. Отрицательная щетка тогда отстоитъ отъ послѣдней на 60°. Изъ показаннаго стрѣлками направленія тока вытекаетъ слѣдующая схема:

—	7	2	4	+
	5	3	1	

Отсюда ясно, что можно установить p положительныхъ и p отрицательныхъ щетокъ, такъ какъ постоянно p сегментовъ послѣдовательно соединены между собою и равнозначущи другъ другу.

Особенно важно при этомъ еще то, что въ этомъ случаѣ ясно видно положеніе катушекъ каждой группы обмотки якоря по отношенію къ полю-



Фиг. 93. Кольцевой якорь съ послѣдовательной обмоткой съ увеличеннымъ числомъ пластинъ на коллекторѣ.

самъ. Катушка 4, напримѣръ, находится въ началѣ южнаго полюса, катушка 2—посрединѣ южнаго полюса, катушка 7—въ концѣ южнаго полюса. Всѣ три катушки, такимъ образомъ, эквивалентны одной катушкѣ съ тройнымъ числомъ витковъ, занимающей цѣлое полюсное дѣленіе.

48. Барабанная обмотка съ послѣдовательнымъ соединеніемъ.

У барабанной обмотки съ послѣдовательнымъ соединеніемъ индуктирующаяся сторона катушки, приходящаяся противъ сѣвернаго полюса, образуетъ съ соотвѣтствующей индуктирующей стороной катушки, расположенной передъ сосѣднимъ южнымъ полюсомъ, одну катушку. За этой катушкой послѣдовательно включаютъ, не возвращаясь непосредственно къ исходной точкѣ, подобно же расположенныя катушки слѣдующихъ паръ полюсовъ.

При полномъ обходѣ вокругъ приходятъ къ мѣсту, отстоящему отъ начальнаго черезъ одно. Если же каждая индуктирующаяся сторона катушки состоитъ изъ одной только проволоки или одного только стержня, то обмотка утрачиваетъ совершенно свой характеръ катушекъ и становится волнообразной (фиг. 94) (винтообразной).

Изъ вышесказаннаго тогда получаемъ для барабана съ послѣдовательной обмоткой:

$$p(y_1 + y_2) = s \pm 2$$

или

$$y_1 + y_2 = \frac{s \pm 2}{p}.$$

Оба шага обмотки откладываются въ одномъ направленіи (волнообразная обмотка). При этомъ y_1 и y_2 должны быть нечетными числами, такъ какъ въ противномъ случаѣ, начиная отъ пункта 1, мы всегда будемъ приходить въ нечетныя мѣста. Случай y_1 нечетное, а y_2—четное, почему $y_1 + y_2$ было бы нечетнымъ, исключается совершенно, такъ какъ по принципу барабанной обмотки между двойнымъ шагомъ обмотки всегда должно находиться одинаковое число началъ обмотки и концовъ. Кромѣ того s должно быть, какъ при всякой барабанной обмоткѣ, четнымъ числомъ. Если y_1 будетъ принято равнымъ y_2, тогда получимъ:

$$y = \frac{s \pm 2}{2p} \text{ или } 2py = s \pm 2.$$

При этомъ s четное, а y нечетное.

При выборѣ различныхъ значеній для y_1 и y_2 можно исходить изъ того, что только при неодинаковыхъ шагахъ получаемъ нечетное значеніе для y_1 и y_2. Положимъ, напримѣръ, $s = 214$ и $p = 6$; тогда имѣемъ:

$$y_1 + y_2 = \frac{214 + 2}{6} = 36.$$

Теперь y_1 не слѣдуетъ выбирать равнымъ $y_2 = 18$, такъ какъ четный шагъ обмотки не дастъ однослойной замкнутой обмотки. Поэтому берутъ:

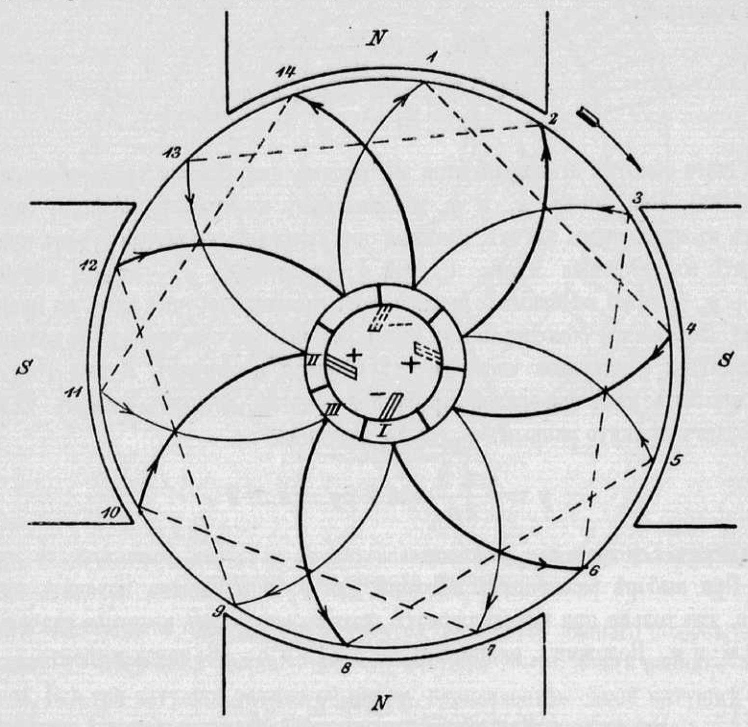
$$y_1 = 19 \text{ и } y_2 = 17.$$

На фиг. 94 представленъ барабанъ съ послѣдовательной обмоткой для $s = 14$ и $p = 2$. Въ этомъ случаѣ получаемъ:

$$y_1 + y_2 = \frac{s \pm 2}{p} = \frac{14 \pm 2}{2} = 8 \text{ или } 6.$$

Примемъ $y_1 + y_2 = 6$, или $y_1 = y_2 = 3$.

Схема обмотки тогда получается такою: 1—4—7—10—13—2 и т. д. Такимъ образомъ, начиная обмотку у 1, ведутъ ее сначала вдоль боковой поверхности, далѣе на заднемъ основаніи барабана переходятъ въ 4, отсюда отъ задняго основанія къ переднему и на переднемъ основаніи по зигзагообразному пути приходятъ черезъ коллекторный сегментъ къ точкѣ 7. Пунктирныя соединенія фиг. 94 расположены на заднемъ основаніи.



Фиг. 94. Барабанный якорь съ послѣдовательной обмоткой.

Обозначимъ опять стрѣлками направленіе тока въ проволокахъ передъ полюсами; проволоки же 13 и 6 оставимъ пока безъ стрѣлокъ, въ виду того, что онѣ лежатъ въ нейтральномъ поясѣ. Руководствуясь направленіемъ тока въ проволокѣ 9, мы приложимъ отрицательную щетку къ сегменту I, а положительную, руководствуясь направленіемъ тока въ проволокѣ 10, къ сегменту II. Вмѣстѣ съ этимъ опредѣлится и токъ въ проволокахъ 6 и 13, и мы получимъ слѣдующую схему соединеній тока:

−			9	12	1	4	7	10	+
	6	3	14	11	8	5	2	13	

Нечетное число катушекъ обусловливаетъ, слѣдовательно, иногда незначительную диссимметрію.

Можно было бы, конечно, въ этомъ случаѣ установить 4 щетки или вообще $2p$ щетокъ, отстоящихъ другъ отъ друга на $\frac{360}{2p}$ градусовъ. На фиг. 94, напримѣръ, пунктиромъ обозначены еще двѣ щетки, діаметрально противолежащія щеткамъ, установленнымъ на сегментахъ I и II. Благодаря этому въ изображенный моментъ будутъ замкнуты на короткое и безъ того мало или совершенно не индуктирующіяся проволоки съ одной стороны 3, 6 и съ другой 2, 13, въ виду того, что одноименныя щетки соединены другъ съ другомъ. Мы получаемъ, такимъ образомъ, слѣдующую схему соединенія тока:

−	9	12	1	4	7	10	+
	14	11	8	5			

Особенно простою является опять обмотка для зубчатыхъ якорей съ индуктирующимися сторонами двухъ катушекъ въ каждомъ каналѣ. При полномъ обходѣ вокругъ, т. е. послѣ $2p$ мѣстъ, приходятъ къ каналу, сосѣднему съ начальнымъ. Въ данномъ случаѣ получается такой же результатъ, что и при обмоткѣ гладкаго якоря, когда не доходятъ на одно мѣсто до начальнаго. Обозначивъ черезъ Y_1 и Y_2 шаги обмотки, отнесенные къ каналамъ, черезъ S число каналовъ, согласно вышеустановленному положенію, получаемъ:

$$p \cdot (Y_1 + Y_2) = S \pm 1$$

или

$$Y_1 + Y_2 = \frac{S \pm 1}{p}.$$

Положимъ, напримѣръ, $S = 15$ и $p = 2$; тогда:

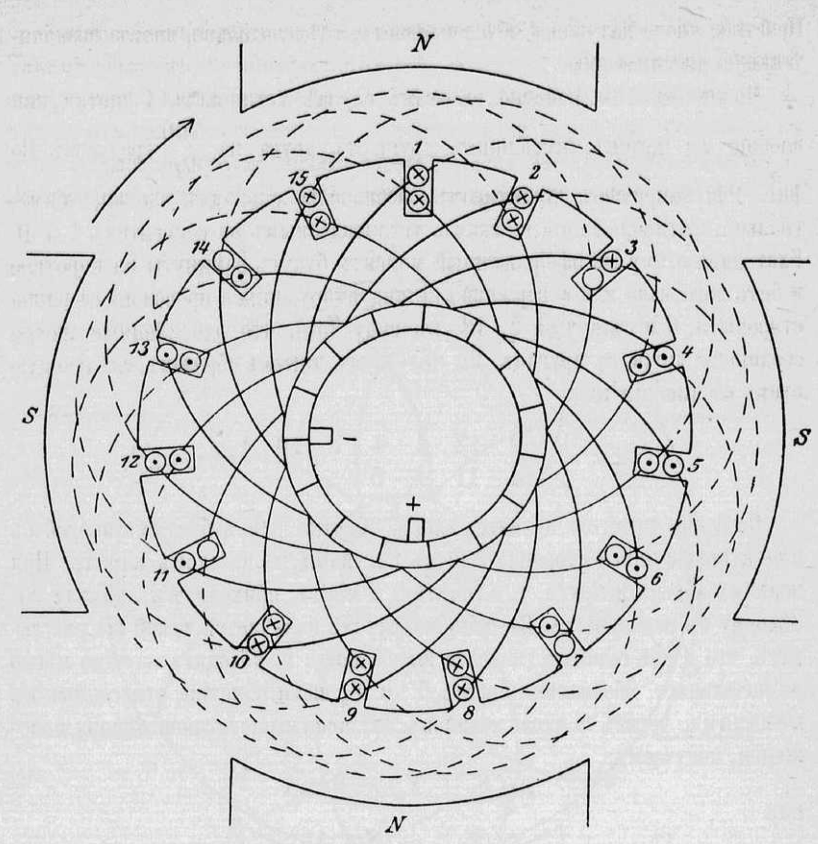
$$Y_1 + Y_2 = \frac{15 \pm 1}{2} = 8 \text{ или } 7.$$

Примемъ:

$$Y_1 = Y_2 = 4;$$

тогда получимъ обмотку, представленную на фиг. 95.

Подобно тому, какъ у кольцевой послѣдовательной обмотки, здѣсь между двумя сосѣдними сегментами всегда включено p катушекъ. Если желательно, во избѣжаніе искренія, устранить замыканія на короткое—вслѣдствіе соприкосновенія щетокъ съ двумя сегментами—такого большого числа катушекъ, то число пластинъ на коллекторѣ дѣлаютъ въ p разъ больше

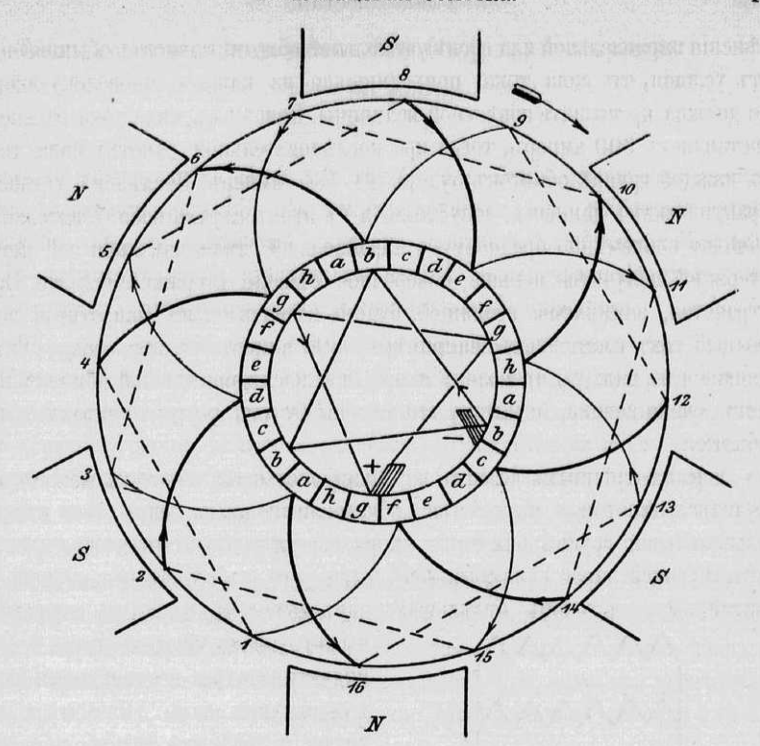


Фиг. 95. Барабанный якорь съ послѣдовательной обмоткой.

числа катушекъ. Въ такомъ случаѣ соединяютъ всѣ сегменты, отстоящіе другъ отъ друга на $\frac{360}{p}$ градусовъ. Пусть, напримѣръ, на фиг. 96 $s=16$ и $p=3$; тогда получаемъ:

$$y=\frac{16+2}{6}=3 .$$

Схема обмотки, такимъ образомъ, получается 1—4—7—10 и т. д. Изъ соединеній внутри коллектора вычерчены только имѣющія значеніе непосредственно для даннаго момента. Соединенія же другихъ сегментовъ обозначены только при помощи однѣхъ и тѣхъ же буквъ. Обозначимъ стрѣлками направленія тока въ проволокахъ, расположенныхъ передъ полюсами. Предполагая, что катушки, находящіяся въ этотъ моментъ въ



Фиг. 96. Барабанный якорь съ послѣдовательной обмоткой съ увеличеннымъ числомъ пластинъ на коллекторѣ.

нейтральномъ поясѣ, 1—4 и 9—12 замкнуты на короткое, мы получимъ для обѣихъ щетокъ положеніе, показанное на чертежѣ. Въ такомъ случаѣ мы имѣемъ слѣдующую схему соединеній тока:

−	6	3	16	13	10	7	+
	15	2	5	8	11	14	

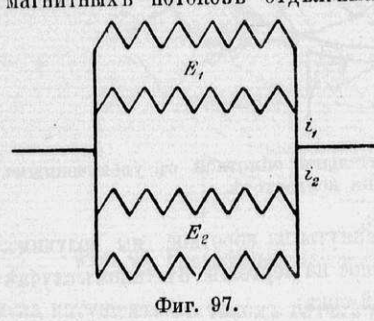
Само собою понятно, что можно установить также и p щетокъ, такъ какъ каждые p сегментовъ коллектора равнозначущи.

49. Кольцевая обмотка съ послѣдовательно-параллельнымъ (смѣшаннымъ) соединеніемъ.

До сихъ поръ мы успѣли ознакомиться съ параллельной обмоткой, примѣнимой для машинъ съ большою силою тока и послѣдовательной волнообразной, для машинъ высокаго напряженія. Въ общемъ, вопросъ о при-

мѣненіи параллельной или послѣдовательной обмотки зависитъ обыкновенно отъ условія, что сила тока, приходящаяся на каждую проволоку якоря, не должна превышать извѣстной величины. Положимъ, сила тока въ якорѣ составляетъ 300 амперъ, тогда при послѣдовательной обмоткѣ сила тока въ каждой группѣ обмотокъ будетъ въ 150 амперъ. Послѣдняя, согласно практическимъ даннымъ, допустима, и въ этомъ случаѣ послѣдовательную обмотку непремѣнно предпочтутъ параллельной, такъ какъ при ней число стержней получится меньше, поперечное сѣченіе стержней больше. Пространство, занимаемое изоляціей, будетъ незначительно. Напротивъ, если полный токъ составляетъ, напримѣръ, 600 амперъ, то сила тока, приходящаяся на каждую проволоку якоря, при послѣдовательной обмоткѣ будетъ очень велика, и потому вынуждены будутъ устроить параллельную обмотку.

У разсмотрѣнныхъ до сихъ поръ параллельныхъ обмотокъ можетъ получиться нѣкоторое неудобство, обусловливающееся тѣмъ, что каждая параллельная группа обмотокъ якоря всегда располагается передъ соотвѣтствующей парой полюсовъ, вслѣдствіе чего, въ случаѣ неодинаковости магнитныхъ потоковъ отдѣльныхъ паръ полюсовъ, въ этихъ параллельныхъ группахъ обмотокъ якоря будутъ индуктироваться неодинаковыя электродвижущія силы. Поэтому и нагрузка отдѣльныхъ группъ, т. е. сила тока въ нихъ, будетъ очень различна. Положимъ, въ верхней вѣтви, фиг. 97, состоящей изъ двухъ группъ, будетъ индуктироваться электродвижущая сила E_1 равная, напримѣръ, 115 вольтамъ. Въ нижней же вѣтви, въ виду уже другого магнитнаго потока, будетъ индуктироваться электродвижущая сила только $E_2 = 114$ вольтъ. Сопротивленіе каждой такой двойной группы пусть $w' = 0{,}05$ ома. Какъ великъ, теперь, будетъ токъ въ каждой изъ двухъ вѣтвей, если полный токъ равенъ 100 амперамъ?



Фиг. 97.

Такъ какъ напряженіе у зажимовъ въ обѣихъ вѣтвяхъ одно и то же, то получаемъ:

$$E_1 - i_1 \cdot w' = E_2 - i_2 \cdot w' = e$$

или

$$115 - i_1 \cdot 0{,}05 = 114 - i_2 \cdot 0{,}05,$$

откуда:

$$i_1 - i_2 = 20.$$

Такъ какъ полный токъ равенъ 100 амперамъ, то получаемъ:

$$i_1 = 60 \text{ ампер}$$
$$i_2 = 40 \quad » \quad .$$

Большая перегрузка въ одной изъ вѣтвей, т. е. болѣе значительная сила тока, вызоветъ искреніе. Въ такихъ случаяхъ для избѣжанія этого искренія обмотку шлейфомъ слѣдуетъ снабжать соединеніями Мордея, дабы неравномѣрности различныхъ вѣтвей могли уравновѣситься уже внутри якоря, и нагрузка на всѣхъ щеткахъ была одинакова.

Но всякая неравномѣрность почти совершенно устраняется при помощи послѣдовательно-параллельной обмотки Арнольда. Въ этомъ случаѣ каждая группа обмотки распредѣляется между различными полюсами, такъ что неравномѣрность полюсовъ одинаково отражается на всѣхъ группахъ якоря. Обмотка является волнообразной, т. е. наматывается постоянно въ одномъ направленіи, такъ что по окончаніи обмотки одной катушки переходятъ дальше въ соотвѣтствующее мѣсто сосѣдней пары полюсовъ.

Обмотка Арнольда не отличается существенно отъ раньше разсмотрѣнной послѣдовательной. Тѣмъ не менѣе она распадается больше, чѣмъ на двѣ параллельныя группы. Это получается отъ того, что послѣ полнаго обхода приходятъ не къ началу сосѣдней катушки, какъ при послѣдовательной обмоткѣ, но къ началу катушки, расположенной за одну или за двѣ до начальной и т. д.

Для выясненія этого перейдемъ снова къ двухполюсной обмоткѣ и посмотримъ, что произойдетъ, если мы при обматываніи будемъ послѣдовательно пропускать одну катушку (фиг. 98). Шагъ обмотки въ этомъ случаѣ будетъ равенъ 2, а число индуктирующихся сторонъ 15; s и y не будутъ имѣть общаго множителя, и мы получимъ однослойную замкнутую обмотку, но распадающуюся на 4 параллельныя группы. Щетки въ этомъ случаѣ должны быть настолько широкими, чтобы перекрывать болѣе одного сегмента. Если принять шагъ обмотки вообще равнымъ a, то обмотка распадается на $2a$ параллельныхъ группъ.

Отсюда выводимъ слѣдующее правило для многополюсныхъ машинъ съ волнообразной обмоткой: **если послѣ полнаго обхода приходятъ въ мѣсто началъ обмотки a-ое отъ исходнаго, то обмотка распадается на 2 a параллельныхъ группъ.**

Легко видѣть, что раньше разсмотрѣнная послѣдовательная обмотка представляетъ собою только частный случай послѣдовательно параллельной обмотки, въ этомъ случаѣ число a равно 1.

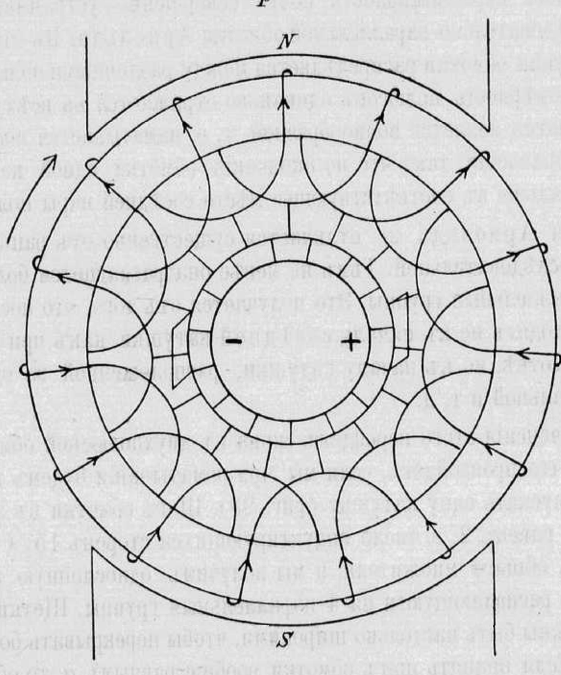
Ограничимся только самымъ важнымъ случаемъ, когда число параллельныхъ групъ равно числу полюсовъ $(p = a)$. При кольцевомъ якорѣ съ послѣдовательно-параллельной обмоткой послѣ полнаго обхода вокругъ, т. е. послѣ $p\,y$ индуктирующихся сторонъ обмотки, мы придемъ къ p-му мѣсту отъ исходнаго.

Откуда получаемъ:

$$py = s \pm p$$

или

$$y = \frac{s}{p} \pm 1.$$



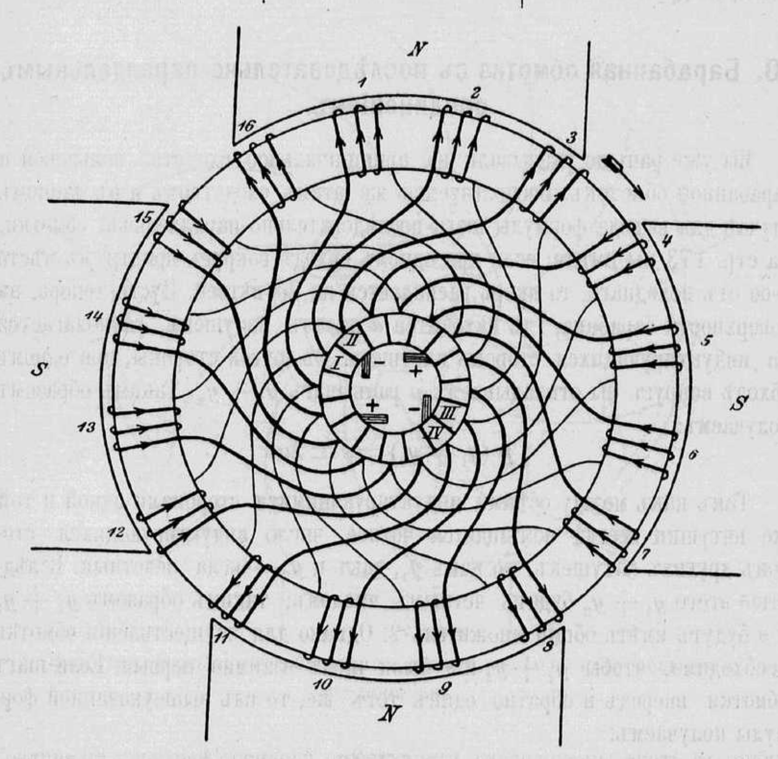
Фиг. 98.

При этомъ s можетъ быть четнымъ или нечетнымъ; s и y должны быть взаимно первыми, если обмотка должна быть однослойною замкнутою. На фиг. 99, напримѣръ, $s = 16$ и $p = 2$. Отсюда слѣдуетъ: $y = 9$ или 7. Если взять $y = 7$, то получается чрезвычайно простая схема обмотки: 1—8—15—6 и т. д.

Всѣ соединенія катушекъ между собою располагаются на передней лицевой поверхности, но въ двухъ различныхъ плоскостяхъ, такъ что взаимное соприкосновеніе абсолютно исключается.

Разставимъ опять стрѣлки направленія тока на проволокахъ якоря передней лицевой поверхности; тогда увидимъ, что токъ съ одной стороны направляется къ мѣсту соединенія катушекъ 8 и 15, а съ другой стороны къ мѣсту соединенія катушекъ 16 и 7. Отсюда опредѣляется положеніе обѣихъ положительныхъ щетокъ, и мы получаемъ слѣдующую схему соединеній тока:

	11	2	9	16	
	4	13	6	15	
−	12	5	14	7	+
	3	10	1	8	



Фиг. 99. Кольцевой якорь съ послѣдовательно-параллельной обмоткой.

Спустя короткій промежутокъ времени послѣ момента, представленнаго на фиг. 99, всѣ 4 щетки будутъ соприкасаться каждая съ двумя сегментами коллектора. Поэтому, напримѣръ, отрицательныя щетки образуютъ слѣдующую короткозамкнутую цѣпь:

I, II, 3, III, IV, 11, I.

Слѣдовательно отрицательными щетками соединяются послѣдовательно катушки 3 и 11, расположенныя въ нейтральномъ поясѣ, и, какъ замкнутыя на короткое, выключаются изъ всей цѣпи тока. Вообще положительными и отрицательными щетками одновременно замыкается на короткое по p катушекъ. Такъ какъ коротко замкнутая цѣпь тока можетъ быть въ какомъ-нибудь мѣстѣ прервана безъ нарушенія соединенія между отдѣльными частями ея, то можно снять одну изъ положительныхъ и одну изъ отрицательныхъ щетокъ. Токъ тогда уже не пойдетъ къ этой щеткѣ, а направится черезъ катушки, находящіяся въ нейтральномъ поясѣ, къ другимъ щеткамъ.

50. Барабанная обмотка съ послѣдовательно-параллельнымъ соединеніемъ.

Мы уже раньше указывали на принципіальное сходство кольцевой и барабанной обмотокъ. Воспользуемся же этимъ сходствомъ и въ данномъ случаѣ для вывода формулы шага послѣдовательно-параллельной обмотки. На стр. 173 мы имѣли: если при одномъ обходѣ вокругъ придти въ мѣсто a-ое отъ исходнаго, то якорь распадается на $2a$ вѣтвей. Пусть, теперь, на поверхности барабана, гдѣ находится a началъ катушекъ, располагается $2a$ индуктирующихся сторонъ катушекъ. Съ другой стороны, при одномъ обходѣ вокругъ мы откладываемъ p разъ шагъ $y_1 + y_2$. Такимъ образомъ получаемъ:

$$p\,(y_1 + y_2) = s \pm 2a.$$

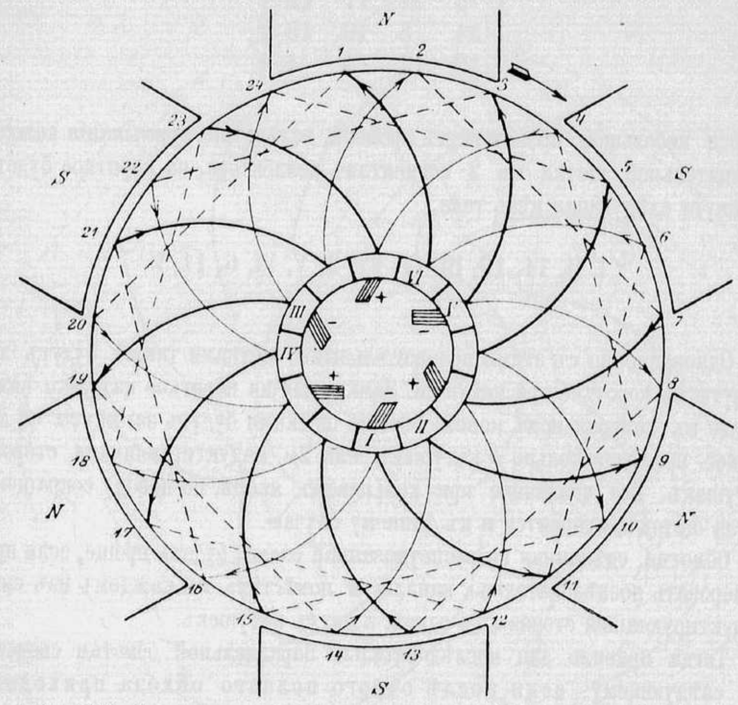
Такъ какъ между обѣими индуктирующимися сторонами одной и той же катушки всегда помѣщается четное число индуктирующихся сторонъ другихъ катушекъ, то какъ y_1, такъ и y_2—числа нечетныя. Вслѣдствіе этого $y_1 + y_2$ будетъ четнымъ числомъ; такимъ образомъ $y_1 + y_2$ и s будутъ имѣть общій множитель 2. Однако для осуществленія обмотки необходимо, чтобы $y_1 + y_2$ и s были числа взаимно первыя. Если шагъ обмотки впередъ и обратно одинъ тотъ же, то изъ вышеуказанной формулы получаемъ:

$$y = \frac{s \pm 2a}{2p}.$$

При этомъ s и y должны быть взаимно первыми между собою. Мы ограничимся опять случаемъ $p = a$. Положимъ, напримѣръ, $s = 24$, $a = 3$ и $p = 3$; тогда $y = 5$ или 3. Шагъ обмотки, равный 3, не приводитъ къ однослойной замкнутой обмоткѣ, такъ какъ въ этомъ случаѣ s и y имѣютъ

общаго множителя. Напримѣръ, выйдя изъ 1, послѣ 8 шаговъ мы пришли бы снова въ дѣленіе 1. Выбравъ, наоборотъ, $y = 5$, мы получимъ слѣдующую схему: 1—6—11—16 и т. д.

На фиг. 100 вычерчена эта обмотка, при чемъ можно предположить, что каждая катушка, напримѣръ 2, 7, состоитъ изъ нѣсколькихъ оборотовъ. Соединенія, расположенныя на передней торцевой поверхности, вычерчены сплошными линіями, расположеныя же на задней—пунктиромъ.



Фиг. 100. Барабанная обмотка съ послѣдовательно-параллельнымъ соединеніемъ.

Соединенія передней торцевой поверхности расположены опять въ двухъ различныхъ плоскостяхъ, при чемъ сильно очерченныя находятся въ передней, а слабо очерченныя—въ задней плоскости. Число сегментовъ составляетъ половину числа индуктирующихся сторонъ катушекъ. Нанесемъ, теперь, извѣстнымъ уже намъ образомъ на всѣхъ соединительныхъ проводахъ передней торцевой поверхности стрѣлки, указывающія направленія тока; тогда опредѣлятся мѣста положительныхъ щетокъ. Это будутъ мѣста,

къ которымъ токъ притекаетъ съ двухъ сторонъ. Подобнымъ же образомъ опредѣлятся мѣста отрицательныхъ щетокъ: это будутъ мѣста, отъ которыхъ токъ расходится въ двѣ стороны. Такимъ образомъ получаемъ слѣдующую схему:

	11	6	1	20	
	16	21	2	7	
	8	13	18	23	
−	3	22	17	12	+
	24	5	10	15	
	19	14	9	4	

Спустя небольшой промежутокъ времени, вслѣдствіе примыканія каждой отрицательной щетки къ 2 сегментамъ коллектора, на короткое будетъ замкнута слѣдующая цѣпь тока:

$$\underline{\text{I, II}},\ 14,\ 19,\ \underline{\text{III, IV}},\ 22,\ 3,\ \underline{\text{V, VI}},\ 6,\ 11,\ \text{I}.$$

Одновременно съ этими положительными щетками также будутъ замкнуты на короткое три катушки. Замкнутыя на короткое катушки находятся въ нейтральномъ поясѣ. Вообще щетками будутъ замкнуты на короткое послѣдовательно p катушекъ или $2p$ индуктирующихся сторонъ катушекъ. Все сказанное при кольцевомъ якорѣ, по поводу сокращенія числа щетокъ, относится и къ данному случаю.

Обмотка, сдѣланная по вышеуказанной схемѣ, будетъ проще, если пронумеровать послѣдовательно каналы и помѣстить въ каждомъ изъ нихъ индуктирующіяся стороны не одной, а двухъ катушекъ.

Тогда правило для послѣдовательно параллельной обмотки сведется къ слѣдующему: если послѣ одного полнаго обхода приходимъ въ a-ое мѣсто отъ исходнаго, то якорь распадается на $2a$ параллельныя группы. Пусть, такимъ образомъ, опять Y_1 и Y_2 шаги, считая каналы, тогда для исключительно параллельнаго соединенія ($p = a$) получимъ равенство:

$$p\,(Y_1 + Y_2) = S \pm p$$

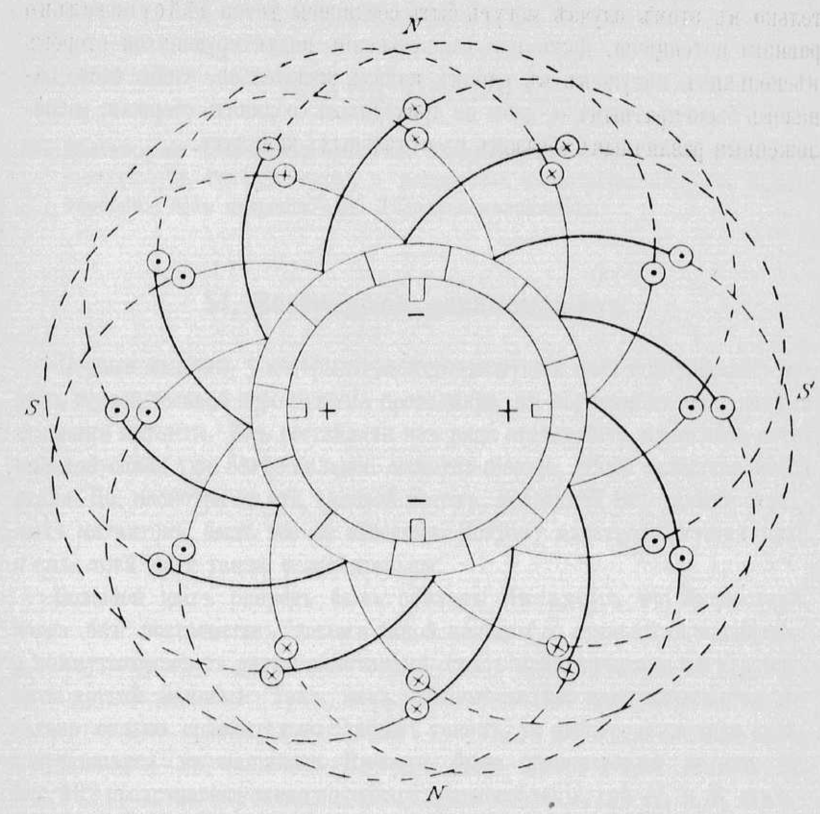
или

$$Y_1 + Y_2 = \frac{S}{p} \pm 1.$$

Положимъ, напримѣръ, какъ на фиг. 101, число катушекъ будетъ 12 и число паръ полюсовъ $p = 2$; тогда число каналовъ $S = 12$, и для исключительно параллельнаго соединенія получимъ:

$$Y_1 + Y_2 = \frac{12}{2} \pm 1 = 7 \text{ или } 5.$$

Принявъ $Y_1 = 3$, $Y_2 = 2$, получимъ обмотку фиг. 101.



Фиг. 101. Барабанный якорь съ послѣдовательно-параллельной обмоткой.

Иногда и при послѣдовательно-параллельной обмоткѣ встрѣчаются затрудненія для осуществленія работы безъ искренія, въ особенности, когда, начиная отъ нейтральнаго пояса, послѣ обхода вокругъ приходятъ въ мѣсто, очень близкое къ краю полюса. Поэтому рекомендуется и при этой обмоткѣ устраивать соединенія Мордея.

Положимъ, какъ на фиг. 101, число параллельныхъ вѣтвей равно числу полюсовъ, т. е. $a = p$, тогда, вслѣдствіе полной симметріи, легко отыскать сегменты равнаго потенціала. Если $\frac{p}{a}$ или $\frac{a}{p}$ будетъ цѣлымъ числомъ и число индуктирующихся сторонъ катушекъ будетъ кратнымъ числа параллельныхъ вѣтвей тока, то также получается полная симметрія. Эта симметрія желательна для работы безъ искренія, но особенно же потому, что только въ этомъ случаѣ могутъ быть соединены точки дѣйствительно равнаго потенціала. Даже при расположеніи индуктирующихся сторонъ нѣсколькихъ катушекъ въ одномъ каналѣ желательно, чтобы число каналовъ было кратнымъ a, дабы не приходилось соединять стержни, расположенныя различнымъ образомъ въ отдѣльныхъ каналахъ.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

51. Возбужденіе динамомашинъ.—52. Индукторный остовъ.—53. Установка щетокъ.—54. Реакція якоря и поперечное намагничиваніе.—55. Коммутированіе безъ искренія.—56. Дѣлитель напряженія.

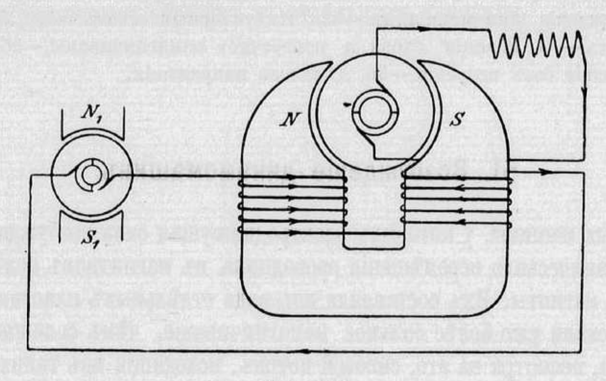
---

51. Возбужденіе динамомашинъ.

Первыя машины, у которыхъ электродвижущая сила возбуждалась путемъ механическаго перемѣщенія проводника въ магнитномъ полѣ, имѣли стальные магниты. Ихъ составляли изъ ряда отдѣльныхъ пластинъ, которыя допускали уже болѣе сильное намагничиваніе, чѣмъ сплошная масса стали. Но, несмотря на это, силовой потокъ, исходящій изъ такихъ стальныхъ магнитовъ, былъ все же невеликъ. Поэтому электродвижущая сила и сила тока были также незначительны.

Большой шагъ впередъ былъ сдѣланъ Вильдомъ въ Манчестерѣ, когда онъ постояннымъ токомъ такой машины со стальными магнитами и коммутаторомъ съ двумя пластинами сталъ намагничивать электромагниты другой машины. Такъ какъ кованое желѣзо намагничивается довольно сильно сравнительно слабымъ токомъ, то электродвижущая сила, получавшаяся въ машинахъ Вильда, была сравнительно велика. На фиг. 102 представлена схема подобнаго приспособленія, гдѣ N_1 и S_1 стальные магниты возбудителя. Токъ, образуемый возбудителемъ, идетъ по обмоткѣ электромагнита болѣе значительной машины, имѣющей индукторный остовъ изъ кованаго желѣза или чугуна. Катушки электромагнита соединены одна съ другою такимъ образомъ, что онѣ при своемъ дѣйствіи другъ другу помогаютъ. Поэтому, если нижній конецъ обмотки лѣвой катушки идетъ по передней лицевой поверхности остова, то присоединенный къ нему нижній конецъ правой катушки долженъ располагаться на задней.

Но сильное развитіе электротехники за послѣдніе годы прошлаго столѣтія могло наступить только благодаря открытію Вернеромъ фонъ Сименсомъ основного принципа динамо. Въ докладѣ, читанномъ имъ въ 1867 году въ Берлинской Академіи Наукъ, онъ указалъ, что остаточный магнетизмъ желѣза можетъ быть использованъ для самовозбужденія машинъ, и тѣмъ далъ техникѣ средство «создавать электрическіе токи безпредѣльной силы» [1]). Здѣсь необходимо замѣтить, что такой простой по своей сущности принципъ, въ связи съ примѣненіемъ коллектора, имѣлъ существенное значеніе въ развитіи электротехники. Только съ открытіемъ фонъ-Сименса появились «динамомашины». Интересно, что нѣсколько дней спустя послѣ опубликованія Сименсомъ своего открытія въ Англіи



Фиг. 102.

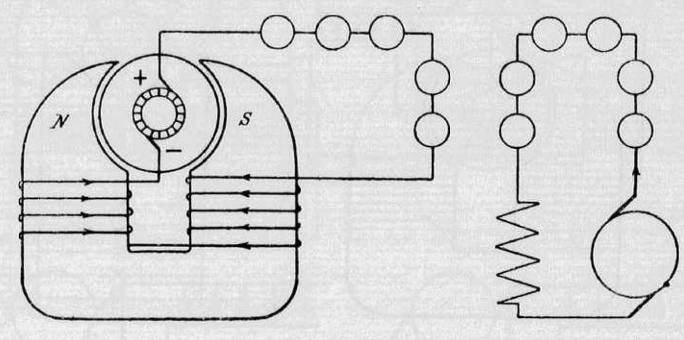
совершенно независимо былъ также опубликованъ принципъ самовозбужденія, а въ Америкѣ уже за нѣсколько недѣль до того было заявлено о привилегіи на это открытіе.

Динамомашинами въ узкомъ смыслѣ слѣдуетъ называть самовозбуждающіяся машины въ отличіе отъ машинъ съ независимымъ возбужденіемъ. За послѣднее время, наоборотъ, принято всякую машину, въ которой только возбуждается электродвижущая сила путемъ перемѣщенія проводника въ магнитномъ полѣ, называть динамо. Термины: «динамо» и «генераторъ» теперь равнозначущи.

Процессъ самовозбужденія машинъ постояннаго тока состоитъ въ томъ, что при пускѣ въ ходъ въ первое мгновеніе пересѣкаются силовыя линіи

[1]) См. Poggendorfsche Annalen 1867 и «Научныя и техническія работы» Вернера Сименса II, стр. 234.

только остаточнаго магнетизма. Вслѣдствіе этого возбуждается незначительная электродвижущая сила, которая, въ случаѣ замкнутой цѣпи, создаетъ въ машинѣ слабый токъ. Этотъ токъ, обходя вокругъ электромагнитовъ машины, фиг. 103, усиливаетъ остаточный магнетизмъ. Благодаря этому увеличивается число пересѣкаемыхъ силовыхъ линій въ секунду, слѣдовательно, усиливается электродвижущая сила, а вслѣдъ за нею и токъ и т. д. Такимъ образомъ при «началѣ работы» машина сама возбуждается и сама увеличиваетъ свое намагничиваніе. Напряженіе получаемаго подобнымъ образомъ магнитнаго поля и величина электродвижущей силы зависятъ въ этомъ случаѣ отъ условій работы. Съ перваго взгляда можно было бы, конечно, заключить, что машина все время будетъ возбуждаться все больше и больше до момента полнаго насыщенія желѣза. Но этого на самомъ дѣлѣ не происходитъ, не говоря уже о томъ, что вообще насыще-



Фиг. 103.

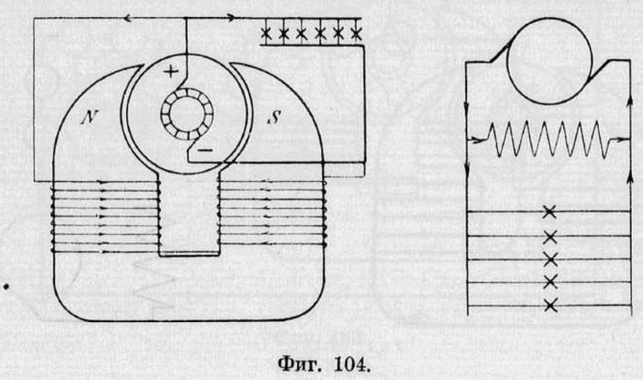
ніе желѣза понятіе весьма относительное. Токъ будетъ усиливаться только до тѣхъ поръ, пока произведеніе изъ силы тока на сопротивленіе всей цѣпи не будетъ равно электродвижущей силѣ, возбуждаемой при данномъ силовомъ потокѣ.

Вслѣдствіе этого уясненіе дѣйствія динамомашинъ сильно затрудняется, такъ какъ магнитный потокъ самъ находится въ зависимости отъ тока. Мы приходимъ въ этомъ случаѣ къ замѣчательному результату: хотя сила тока по закону Ома выражается черезъ электродвижущую силу и сопротивленіе, но, съ другой стороны, электродвижущая сила сама зависитъ отъ силы тока и отъ сопротивленія. Теперь, едва ли можно оставить въ силѣ наше прежнее предположеніе, что электродвижущая сила и сопротивленіе цѣпи должны быть главными заданіями, и что сила тока вытекаетъ затѣмъ уже изъ нихъ обоихъ по закону Ома. Электродвижу-

щая сила динамомашины не является функцiей одной только машины, которую можно было бы опредѣлить постояннымъ силовымъ потокомъ, числомъ оборотовъ и числомъ проволокъ. Напротивъ, электродвижущая сила зависитъ еще отъ условiй работы, т. е. отъ сопротивленiя, заключеннаго между зажимами, или, практически, отъ потребленiя тока.

Что касается обмотки электромагнитовъ, то у машинъ съ послѣдовательнымъ возбужденiемъ (фиг. 103) она состоитъ изъ небольшого числа витковъ толстой проволоки, по которой идетъ главный токъ. Здѣсь якорь, обмотка электромагнитовъ и внѣшняя цѣпь включены послѣдовательно другъ съ другомъ.

У динамомашины съ параллельнымъ возбужденiемъ или шунтовой динамомашины (фиг. 104) обмотка электромагнитовъ состоитъ изъ большого числа витковъ тонкой проволоки. Обмотка присо-



Фиг. 104.

единена непосредственно къ щеткамъ, слѣдовательно, включена параллельно внѣшней цѣпи. Вслѣдствiе большого сопротивленiя обмотки, токъ, идущiй черезъ нее, очень невеликъ сравнительно съ токомъ во внѣшней цѣпи.

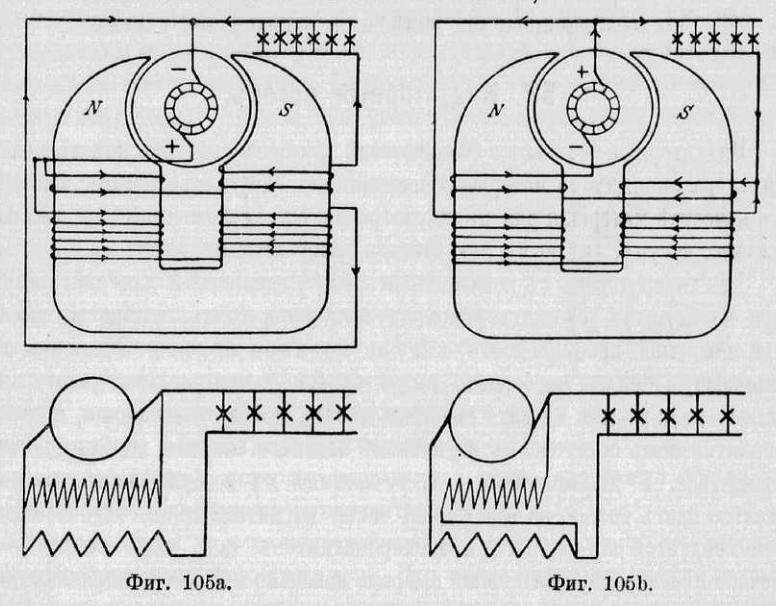
Наконецъ, компаундъ динамомашина является комбинацiей машинъ съ послѣдовательнымъ и параллельнымъ возбужденiями (фиг. 105a и 105b). Она представляетъ собою собственно шунтовую машину, магнитное поле которой усиливается еще дѣйствiемъ обмотки, по которой проходитъ главный токъ. Слѣдовательно, обмотку необходимо устраивать такимъ образомъ, чтобы токи въ послѣдовательной и параллельной обмоткахъ были одного направленiя. На фиг. 105a шунтъ отвѣтвляется у щетокъ. Онъ включенъ параллельно съ послѣдовательной обмоткой и внѣшней цѣпью. На фиг. 105b шунтъ отвѣтвляется отъ зажимовъ машинъ; онъ включенъ,

слѣдовательно, параллельно внѣшней цѣпи. Смѣшанная обмотка служитъ для того, чтобы при увеличенiи расхода тока сохранять постояннымъ напряженiе у зажимовъ, несмотря на потерю напряженiя въ якорѣ благодаря усилiю тока.

Особенный интересъ представляютъ условiя, при которыхъ самовозбужденiе динамомашинъ является невозможнымъ. Пускъ въ ходъ машины будетъ затрудненъ или невозможенъ:

I. Когда индуктируемая электродвижущая сила въ первый моментъ очень мала, вслѣдствiе:

1. незначительнаго остаточнаго магнетизма;



Фиг. 105a. Фиг. 105b.

2. слишкомъ малаго числа оборотовъ.

II. Когда получаемый намагничивающiй токъ очень незначителенъ, вслѣдствiе:

1. большого переходнаго сопротивленiя щетокъ;
2. большого внѣшняго сопротивленiя въ машинѣ съ послѣдовательнымъ возбужденiемъ;
3. большого сопротивленiя обмотки электромагнитовъ въ шунтовой машинѣ;
4. очень небольшого внѣшняго сопротивленiя въ шунтовой машинѣ, наприм. при короткомъ замыканiи, когда напряженiе у зажимовъ,

а слѣдовательно и токъ въ обмоткѣ электромагнитовъ равны нулю.

III. Когда образующіяся силовыя линіи недостаточно или вовсе не усиливаютъ остаточнаго магнетизма, вслѣдствіе:
1. большого междужелѣзнаго пространства;
2. неправильнаго присоединенія обмотки электромагнитовъ при данномъ направленіи вращенія;
3. измѣненія направленія вращенія при данномъ соединеніи обмотки электромагнитовъ.

Перемагничиваніе полюсовъ не оказываетъ вліянія на пускъ въ ходъ машины; оно измѣняетъ только знаки у щетокъ.

52. Индукторный остовъ.

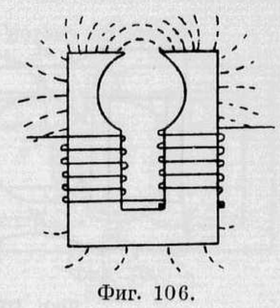
Индукторные остовы въ большинствѣ случаевъ состоятъ изъ нѣсколькихъ различныхъ по матеріалу свинченныхъ другъ съ другомъ частей. Въ качествѣ матеріала для нихъ употребляютъ листовое желѣзо, кованое желѣзо, чугунъ, литую мягкую сталь и литое желѣзо.

Для генераторовъ съ независимымъ возбужденіемъ и для двигателей при извѣстныхъ условіяхъ рекомендуется употреблять, вслѣдствіе высокой магнитной проницаемости, мягкое кованое желѣзо. У машины съ самовозбужденіемъ, наоборотъ, индукторный остовъ нельзя дѣлать исключительно изъ мягкаго кованаго желѣза, потому что машина, при не значительномъ остаточномъ магнетизмѣ кованаго желѣза, не будетъ возбуждаться. У динамомашинъ, т. е. машинъ съ возбужденіемъ, мягкое желѣзо идетъ только на нѣкоторыя части магнитной цѣпи. Оно особенно рекомендуется для стержней электромагнитовъ, такъ какъ тогда поперечное сѣченіе стержня можно выбрать довольно небольшихъ размѣровъ. При этомъ получаютъ экономію не только въ желѣзѣ, но и въ мѣди, такъ какъ не только длина оборота проволоки будетъ меньше, но и при меньшей длинѣ можно выбрать меньшее поперечное сѣченіе мѣдной проволоки, чѣмъ при примѣненіи чугуна.

Листовое желѣзо (якорное) находитъ примѣненіе какъ при устройствѣ полюсныхъ надставокъ, такъ и самихъ полюсовъ, такъ какъ благодаря такому разслоенію избѣгаютъ потери на токи Фуко.

Чугунъ, съ его большимъ остаточнымъ магнетизмомъ, служилъ въ прежнее время почти исключительнымъ, единственнымъ матеріаломъ для индукторнаго остова. Изъ-за своей незначительной магнитной проницаемости, онъ находитъ еще и въ настоящее время примѣненіе только у небольшихъ машинъ. При этомъ фундаментная плита и индукторный остовъ отливаются заодно. Незначительные расходы на изготовленіе и дешевая цѣна чугуна покрываетъ съ избыткомъ въ этомъ случаѣ невыгоду, вызываемую большимъ вѣсомъ мѣди и чугуна, что обусловливается плохою магнитною проницаемостью послѣдняго.

За послѣднее время литая мягкая сталь вытѣснила чугунъ повсюду, гдѣ только идетъ дѣло о постройкѣ большихъ машинъ съ большимъ коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія. Литая мягкая сталь соединяетъ въ себѣ сильный остаточный магнетизмъ съ большою магнитною проницаемостью, которая мало разнится отъ проницаемости мягкаго желѣза. Въ этомъ случаѣ возможно допустить магнитную индукцію болѣе сильную, чѣмъ при чугунѣ, для чего въ то же время требуется сравнительно небольшое число амперъвитковъ на электромагнитахъ. Слѣдовательно, вѣсъ магнитнаго матеріала и мѣди индукторнаго остова при употребленіи литой стали значительно уменьшается. Благодаря этому машины становятся изящнѣе и легче, а также оказываются устроенными болѣе раціонально по отношенію къ условіямъ охлажденія. Кромѣ того болѣе значительная допускаемая плотность магнитнаго потока, какъ увидимъ дальше, оказываетъ существенное вліяніе на работу безъ искренія. Этимъ столь цѣннымъ преимуществамъ литой стали можно противопоставить лишь высокую цѣну ея и иногда большіе расходы на обработку, которыя вызываются тѣмъ, что самый остовъ не удается отливать заодно съ фундаментной плитой.

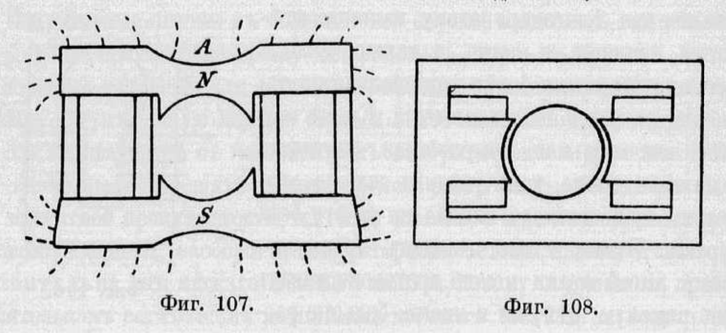

Фиг. 106.

Что касается формы индукторнаго остова, то сначала его строили подковообразнымъ (типъ Сименса). При этомъ скоро же замѣтили, что выбранныя сначала чрезмѣрно длинныя полюсныя части совершенно безполезно увеличиваютъ путь магнитнаго потока въ желѣзѣ. Далѣе оказалось, что форма, наиболѣе соотвѣтствующая очертанію пути магнитнаго потока, является и наиболѣе выгодною. Пока магнитная линія идетъ сквозь одинъ и тотъ же матеріалъ, она никогда не образуетъ угловъ, и острые края индукторнаго остова на фиг. 106 безполезно увеличиваютъ вѣсъ магнитнаго матеріала машины и ея боковое разсѣяніе. Поэтому полюсы необходимо округлить или скосить, какъ показано на фиг. 103.

Слѣдуя чисто историческому развитію, укажемъ, далѣе, манчестерскій типъ (фиг. 107). Соединеніе катушекъ электромагнита здѣсь устраивается такимъ образомъ, что магнитодвижущія силы обѣихъ кату-

шекъ включены параллельно. Магнитные потоки идутъ на фиг. 107 въ обоихъ полюсахъ снизу наверхъ, сталкиваются при N и образуютъ въ этомъ мѣстѣ сѣверный полюсъ. Для расчета необходимаго числа ампервитковъ лучше всего раздѣлить остовъ машины вертикальною плоскостью, проведенною параллельно оси, на двѣ части и опредѣлить ампервитки отдѣльно для каждой части. При этомъ необходимо обратить вниманіе на то, что черезъ поперечное сѣченіе сердечника электромагнита проходитъ только половинный потокъ. Затѣмъ полученное число ампервитковъ необходимо наложить на каждый изъ обоихъ сердечниковъ, такъ какъ магнитодвижущія силы обѣихъ катушекъ соединены параллельно и не складываются.

Въ настоящее время наиболѣе употребительною формою магнитнаго остова является типъ **Ламейера**, благодаря весьма раціональному распредѣленію частей его въ магнитномъ отношеніи (фиг. 108). Почти всѣ многополюсные индукторные остовы принадлежатъ къ этому типу съ замкнутою магнитною цѣпью. При этомъ каждый полюсъ имѣетъ обыкновенно свою возбуждающую катушку (фиг. 128), но возможно также возбужденіе и одною катушкою (фиг. 109) пары полюсовъ. Послѣднее устройство примѣняется тамъ, гдѣ вызывается необходимость въ наивозможно меньшихъ размѣровъ двигателя, какъ, напримѣръ, у городскихъ трамваевъ. Несимметричность расположенія частей магнитной цѣпи можетъ вызвать образованіе искренія на коллекторѣ.



Фиг. 107. Фиг. 108.

Что касается динамомашинъ съ **внутренними полюсами**, то укрѣпленіе якоря, вращающагося вокругъ неподвижнаго колеса съ индукторами, представляетъ извѣстнаго рода затрудненіе, такъ что отъ этой въ общемъ довольно хорошей конструкціи снова отказались. Для машинъ же перемѣннаго тока, наоборотъ, машина съ внутренними полюсами является наилучшей конструкціей, при чемъ въ этомъ случаѣ вращаются индукторы, а якорь, установленный снаружи, остается неподвижнымъ.

Сравнимъ различные типы машинъ по ихъ **магнитной утечкѣ**.

Подъ линіями потока утечки понимаютъ силовыя линіи, замыкающіяся непосредственно черезъ воздухъ между стержнями полюсовъ или между краями полюсовъ, минуя якорь. Такимъ образомъ, магнитный потокъ въ электромагнитахъ, вслѣдствіе разсѣянія будетъ болѣе полезнаго магнитнаго потока въ якорѣ. Поэтому большая магнитная индукція въ стержняхъ электромагнитовъ и соединительной части между сердечниками требуетъ соразмѣрно большаго числа ампервитковъ на сердечникахъ электромагнитовъ.

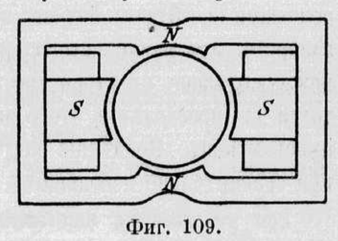
Пусть:

N магнитный потокъ, входящій въ якорь изъ сѣвернаго полюса;

N_s потокъ утечки, разсѣивающійся изъ сѣвернаго полюса по обѣ стороны;

$\sigma = \frac{N + N_s}{N}$ коэффиціентъ разсѣянія, т. е. отношеніе магнитнаго потока въ электромагнитахъ къ магнитому потоку въ якорѣ.

Для опредѣленія этого коэффиціента опытнымъ путемъ на сердечникъ магнита наматывается указаннымъ на фиг. 106 образомъ вторичная катушка, концы которой присоединяются къ баллистическому гальванометру. При размыканіи возбуждающаго тока всѣ силовыя линіи сокращаются и пересѣкаютъ вторичную катушку.



Фиг. 109.

Отклоненіе гальванометра тогда является мѣрою магнитнаго потока. Подобный же опытъ производится съ вторичною катушкою, намотанной на якорь, и отношеніе отклоненій даетъ непосредственно коэффиціентъ σ. По даннымъ испытаній, произведенныхъ уже довольно давно, считаютъ:

$\sigma = 1{,}5$ для манчестерскаго типа;
$\sigma = 1{,}36$ для типа **Сименса**;
$\sigma = 1{,}1$ до $1{,}2$ для типа **Ламейера**.

Разсѣяніе въ манчестерскомъ типѣ наибольшее, такъ какъ силовыя линіи, сталкиваясь другъ съ другомъ у образуемаго ими полюса, взаимно приподнимаютъ другъ друга кверху и въ большомъ числѣ отбрасываются въ воздухъ (ср. фиг. 107). Выемка при A, устраиваемая съ цѣлью приспособить магнитную цѣпь къ пути силовыхъ линій, въ этомъ случаѣ мало помогаетъ.

Типъ **Сименса** (фиг. 103) также является не вполнѣ благопріятнымъ по разсѣянію, такъ какъ магнитные стержни въ немъ расположены доста-

точно близко другъ около друга и такъ какъ магнитные полюсы имѣютъ большую поверхность, сильно излучающую въ воздухъ силовыя линіи. Округленіе полюсовъ, конечно, немного уменьшаетъ разсѣяніе, такъ какъ путь для потока утечки становится длиннѣе и менѣе удобнымъ.

Наиболѣе совершеннымъ является типъ Ламейера (фиг. 108), такъ какъ у него возбуждающія катушки находятся совсѣмъ вблизи якоря и вслѣдствіе этого поперечное сѣченіе поля утечки отъ заостреннаго края одного полюса къ краю другого полюса довольно невелико.

Конечно, вышеприведенныя значенія σ слѣдуетъ считать величинами только приблизительными, потому что даже у машинъ одного и того же типа разсѣяніе можетъ быть различнымъ, смотря по тому, будетъ ли магнитное сопротивленіе потока утечки больше или меньше. Такъ, напримѣръ, при однихъ и тѣхъ же условіяхъ потокъ утечки при прямоугольномъ поперечномъ сѣченіи стержня электромагнита будетъ больше, чѣмъ при кругломъ; точно также при незначительномъ разстояніи между разноименными полюсами онъ будетъ больше, чѣмъ при значительномъ. Кромѣ того, многое зависитъ отъ магнитнаго сопротивленія полезнаго поля. Положимъ, что междужелѣзное пространство между полюсами и якоремъ очень велико, тогда для преодолѣнія этого магнитнаго сопротивленія необходимо много ампервитковъ. Послѣдніе дадутъ тогда особенно большой потокъ утечки при сравнительно небольшомъ полезномъ магнитномъ потокѣ.

Все это станетъ еще болѣе понятнымъ, если разсматривать потокъ утечки и полезный магнитный потокъ, какъ два параллельные потока, которые обратно пропорціональны магнитному сопротивленію соотвѣтствующихъ имъ путей. Поэтому отношеніе потока утечки къ полезному магнитному потоку равно отношенію сопротивленія полезнаго поля къ сопротивленію поля утечки. Такимъ образомъ машины одного и того же типа обладаютъ, какъ видимъ, совершенно различными процентами разсѣянія.

Съ другой стороны, значеніе σ можетъ быть у одной и той же машины при двухъ неодинаковыхъ состояніяхъ работы различнымъ, такъ какъ обмотку якоря не всегда пересѣкаетъ одно и то же число силовыхъ линій. Вслѣдствіе этого и зубцы, смотря по условіямъ работы, бываютъ насыщенными различно, и ихъ магнитное сопротивленіе не постоянно. Къ этому присоединяется еще то, что ампервитки якоря, согласно статьи 54, создаютъ, смотря по условіямъ работы, магнитному потоку перемѣнное противодавленіе X_g, вслѣдствіе чего приходится увеличивать потребное для этого число ампервитковъ на индукторахъ, а это влечетъ за собою увеличеніе разсѣянія.

Можно разсчитать полный магнитный потокъ утечки, если магнитное сопротивленіе этой послѣдней можетъ быть выражено алгебраически и если возможны геометрическія измѣренія машины. Пусть $\boldsymbol{Q}_s$ поперечное сѣченіе и $\boldsymbol{l}_s$ длина пути утечки, тогда, согласно статьѣ 21, сопротивленіе поля разсѣянія $\boldsymbol{W}_s$ будетъ:

$$\boldsymbol{W}_s = \frac{\boldsymbol{l}_s}{0{,}4\,\pi \cdot \boldsymbol{Q}_s} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad \text{(a)}$$

Пусть для проведенія магнитнаго потока $\boldsymbol{N}$ сквозь якорь, зубцы и междужелѣзное пространство необходимо число ампервитковъ $X_a + X_z + X_l$ и кромѣ того еще нѣкоторое давленіе для преодолѣнія противодавленія X_g ампервитковъ якоря; тогда потокъ $\boldsymbol{N}_s$ будетъ, согласно закону Ома, для магнитной цѣпи:

$$\boldsymbol{N}_s = \frac{X_a + X_z + X_l + X_g}{\boldsymbol{W}_s}.$$

Полный же магнитный потокъ въ электромагнитахъ тогда $\boldsymbol{N}_m = \boldsymbol{N} + \boldsymbol{N}_s$. Примѣръ такого расчета приведенъ въ статьѣ 31. Но не слѣдуетъ особенно полагаться на подобнаго рода расчеты.

Слѣдующее разсужденіе приведетъ насъ къ той же цѣли. Ширина нейтральнаго пояса пропорціональна вообще полюсному дѣленію $\frac{\boldsymbol{D} \cdot \pi}{2p}$. Отсюда длина потока утечки, принимая во вниманіе коэффиціентъ пропорціональности K_1, будетъ:

$$\boldsymbol{l}_s = K_1 \cdot \frac{\boldsymbol{D} \cdot \pi}{2p},$$

съ другой же стороны поперечное сѣченіе поля утечки $\boldsymbol{Q}_s$ равно длинѣ якоря $\boldsymbol{b}$, умноженной на величину, зависящую отъ радіальной длины сердечника электромагнита. Такъ какъ эта послѣдняя при грубомъ приближеніи пропорціональна полюсному дѣленію, то, принимая во вниманіе коэффиціентъ пропорціональности K_2, получимъ:

$$\boldsymbol{Q}_s = K_2 \cdot \boldsymbol{b} \cdot \frac{\boldsymbol{D} \cdot \pi}{2p}.$$

У дроби $\frac{\boldsymbol{l}_s}{\boldsymbol{Q}_s}$, которая при пренебреженіи постояннымъ коэффиціентомъ пропорціональности представляетъ сопротивленіе поля утечки, $\frac{\boldsymbol{D} \cdot \pi}{2p}$ сокра-

щается. Отсюда магнитное сопротивленіе будетъ обратно пропорціонально длинѣ якоря b. Каппъ вмѣсто знаменателя b ставитъ среднее геометрическое изъ полюснаго дѣленія и длины якоря, т. е., не принимая во вниманіе постоянный коэффиціентъ, величину $\sqrt{\frac{D}{p} \cdot b}$ [1]). Если затѣмъ обозначимъ черезъ K постоянный коэффиціентъ, который для типа Ламейера равенъ 0,35—0,55, то, согласно Каппу, наше уравненіе для магнитной проницаемости поля утечки приметъ видъ:

$$W_s = \frac{K}{\sqrt{\frac{D}{p} \cdot b}}.$$

Положимъ, діаметръ якоря равенъ 60 см, длина 40 см, число паръ полюсовъ 2 и коэффиціентъ $K = 0{,}35$, тогда получаемъ:

$$W_s = \frac{K}{\sqrt{\frac{D}{p} \cdot b}} = \frac{0{,}35}{\sqrt{1200}} = 0{,}01.$$

Для магнитнаго давленія, приходящагося на полюсныя надставки, напримѣръ, отъ 10 000 ампервитковъ, получимъ потокъ утечки:

$$N_s = \frac{10\,000}{0{,}01} = 1 \cdot 10^6.$$

Но и здѣсь необходимо опять-таки имѣть въ виду, что опредѣленіе утечки даетъ недостаточно надежные результаты.

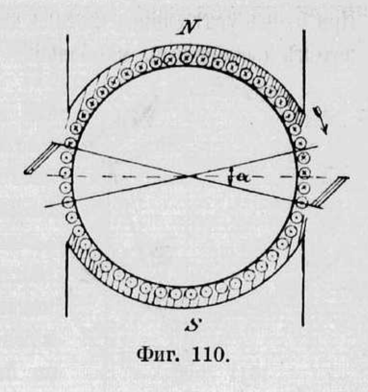
53. Установка щетокъ.

Въ ст. 43 мы видѣли, что токъ изъ каждой вѣтви якоря притекаетъ къ нейтральному поясу. Слѣдовательно, теоретически щетки должны находиться въ нейтральномъ поясѣ. Такъ какъ соединенія съ коллекторомъ являются болѣе или менѣе искривленными, то щетки вообще нужно устанавливать такимъ образомъ, чтобы переходъ катушки изъ одной половины якоря въ другую происходилъ въ нейтральномъ поясѣ. Нейтральной линіей пояса при этомъ является діаметръ якоря, перпендикулярный къ магнитному

[1]) См. Kapp, «Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom». 4 Aufl. S. 211.

потоку. При неправильной установкѣ щетокъ, одна и та же группа якоря находилась бы одновременно передъ разноименными полюсами. Въ отдѣльныхъ проволокахъ одной и той же группы индуктировались бы тогда противоположно направленныя электродвижущія силы, которыя отчасти взаимно уничтожались бы другъ другомъ. Это вызвало бы потерю электродвижущей силы.

Къ тому же щетка, располагаясь на двухъ пластинахъ коллектора, замыкаетъ на короткое, смотря по обстоятельствамъ, одну или нѣсколько катушекъ. Если это короткое замыканіе происходитъ не въ нейтральномъ поясѣ, а въ сильномъ магнитномъ полѣ, то въ короткозамкнутой катушкѣ возбуждается внѣшнимъ полемъ большая электродвижущая сила. Послѣдняя образуетъ при незначительномъ сопротивленіи катушки во время короткаго замыканія сильный токъ. Слѣдствіемъ этого является сильное искреніе, когда щетка при вращеніи коллектора сходитъ съ коротко замкнутаго сегмента. Такимъ образомъ и для работы безъ искренія необходимо, чтобы щетки по возможности находились въ нейтральномъ поясѣ.



Фиг. 110.

Но при этомъ слѣдуетъ принять во вниманіе то, что нейтральная линія только при машинѣ безъ тока, т. е. при холостомъ ходѣ, перпендикулярна къ направленію силовыхъ линій. Опытъ съ желѣзными опилками указываетъ, что у генератора, лишь только послѣдній начнетъ доставлять токъ, направленіе силовыхъ линій, проходящихъ черезъ якорь, перемѣщается въ сторону вращенія (фиг. 110).

Поэтому, какъ только якорь начнетъ доставлять токъ, щетки слѣдуетъ также перемѣстить въ сторону вращенія изъ теоретическаго положенія нейтральной линіи, соотвѣтствующаго холостому ходу, въ положеніе ея практическое, опредѣляемое рабочимъ состояніемъ машины.

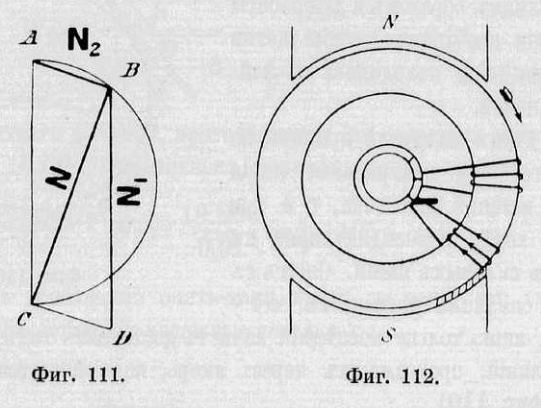
Направленіе этой существующей на практикѣ нейтральной линіи мы получимъ, принявъ во вниманіе, что якорь, по которому проходитъ токъ, становится самъ электромагнитомъ, силовыя линіи котораго пересѣкаютъ якорь по діаметру расположенія щетокъ. Магнитный потокъ $N_2 = BA$ (фиг. 111), образуемый якоремъ, вмѣстѣ съ потокомъ $N_1 = BD$, исходящимъ изъ полюсовъ, даетъ результирующій потокъ $N = BC$.

Правило Ампера указываетъ намъ направленіе магнитнаго потока N_2 на фиг. 111. Такъ какъ діаметръ расположенія щетокъ при правильной установкѣ щетокъ перпендикуляренъ къ результирующему потоку N и съ другой стороны совпадаетъ съ магнитнымъ потокомъ N_2, создаваемымъ якоремъ, то N_2 и N должны быть другъ къ другу перпендикулярны.

Если бы якорь весь былъ окруженъ желѣзомъ, то магнитное сопротивленіе силового потока, создаваемаго якоремъ, было бы одинаково съ сопротивленіемъ, имѣющимся для потока, создаваемаго электромагнитами. Если черезъ α обозначимъ двойной уголъ сдвига щетокъ, то простой уголъ сдвига $\frac{\alpha}{2}$ опредѣлится слѣдующимъ уравненіемъ:

$$\sin\frac{\alpha}{2}=\frac{N_2}{N_1}.$$

При этомъ углѣ сдвига щетокъ машина при данномъ якорномъ магнитномъ потокѣ доставляетъ наибольшее число вольтъ. Вышеуказанное предположеніе на практикѣ не оправдывается и поэтому предварительное опредѣленіе угла сдвига щетокъ при помощи вышеуказаннаго уравненія неудобопримѣнимо.



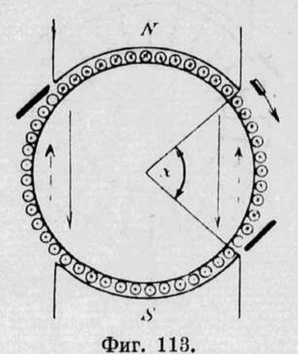
Фиг. 111. Фиг. 112.

Кромѣ того щетки на практикѣ во время работы придвигаются почти къ самому краю полюса. Токъ же въ короткозамкнутой катушкѣ долженъ перемѣнить свое направленіе какъ разъ во время этого короткаго замыканія, но это явленіе будетъ замедляться, согласно ст. 32, самоиндукціей катушки. Въ виду этого у генераторовъ щетки перестанавливаются по направленію вращенія за существующую въ дѣйствительности нейтральную линію вплоть до вступленія въ рабочій магнитный потокъ (фиг. 112). Магнитное поле машины тогда индуктируетъ въ катушкѣ электродвижущую силу, которая уравновѣшиваетъ самоиндукцію, и въ силу этого оказывается возможнымъ коммутированіе безъ искренія. Небольшая потеря въ электродвижущей силѣ, которая будетъ этимъ вызвана, не существенна.

У двигателей же на основаніи тѣхъ же вышеуказанныхъ положеній щетки перемѣщаютъ въ направленіи, обратномъ вращенію. Если моторы предназначены для реверсивной (впередъ и назадъ) работы, то щетки устанавливаются по теоретически нейтральной линіи.

54. Реакція якоря и поперечное намагничиваніе.

Если щетки находятся вблизи краевъ полюсовъ, то вся обмотка якоря распадается на двѣ группы, изъ которыхъ одна располагается внутри угла α нейтральнаго пояса, а другая внутри полюсной дуги β. Какъ видно изъ фиг. 113, витки обмотки якоря, находящіеся въ нейтральномъ поясѣ, противодѣйствуютъ виткамъ обмотки электромагнита, стремясь создать магнитный потокъ, обозначенный пунктиромъ. Это видно и изъ фиг. 111, гдѣ слагающая магнитнаго потока N_2, создаваемаго якоремъ, направлена прямо противоположно магнитному потоку, исходящему изъ полюсовъ. Дѣйствительный равнодѣйствующій магнитный потокъ, проходящій сквозь магниты и якорь, создается разностью ампервитковъ на индукторахъ и противодѣйствующихъ ампервитковъ якоря X_g. Пусть общее число проволокъ на якорѣ равно z; тогда внутри угла α располагается $\frac{z\cdot\alpha}{360}$ проволокъ (фиг. 113). Это въ то же время представляетъ число витковъ, расположенныхъ въ нейтральномъ поясѣ. Если число параллельныхъ группъ будетъ $2\cdot a$, то $\frac{i_a}{2a}$ будетъ токъ въ каждой проволокѣ якоря и число противодѣйствующихъ ампервитковъ будетъ:



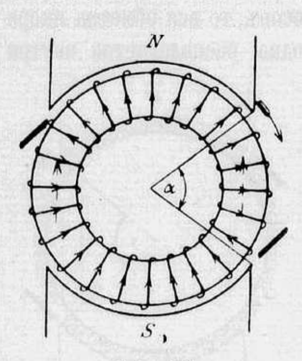
Фиг. 113.

$$X_g=\frac{i_a}{2a}\cdot\frac{z\cdot\alpha}{360}.$$

Это уравненіе справедливо одинаково какъ для послѣдовательной и параллельной обмотокъ, такъ и для барабаннаго и кольцевого якоря. Витки

кольца, которые на фиг. 114 намотаны въ нейтральномъ поясѣ на обѣихъ половинахъ кольца, равнозначущи одной катушкѣ, проходящей при барабанной обмоткѣ черезъ весь якорь.

Противодѣйствующіе ампервитки разсматриваются, какъ реакція якоря, и ея вліяніе сказывается въ томъ, что магнитный потокъ при работѣ ослабляется сравнительно съ потокомъ при холостомъ ходѣ, а вслѣдъ за этимъ уменьшается и напряженіе. Поэтому при конструированіи машины нужно необходимое число ампервитковъ для прохожденія магнитнаго потока черезъ якорь, воздухъ и магнитную цѣпь увеличить на величину реакціи якоря X_g. Эту величину принимаютъ обыкновенно равною 10—15% полнаго возбужденія индукторовъ. Но такъ какъ машины въ большинствѣ случаевъ работаютъ съ насыщеніемъ желѣза, т. е. въ тѣхъ предѣлахъ кривой намагничиванія, гдѣ эта послѣдняя оказывается пологою, то достаточно большой реакціи якоря соотвѣтствуетъ незначительная разница напряженія между холостымъ ходомъ и работою съ нагрузкой.



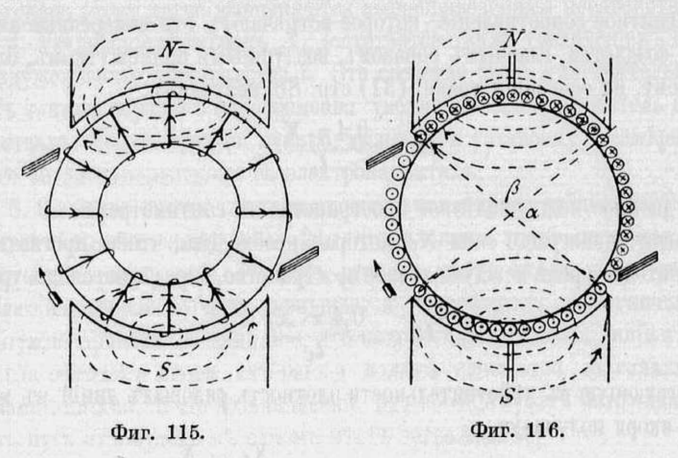
Фиг. 114.

Въ виду того, что при обмоткѣ по хордамъ каждый каналъ въ нейтральномъ поясѣ проходится токами противоположнаго направленія (ср. фиг. 91), полагаютъ, что реакція якоря въ этомъ случаѣ особенно мала. Однако нѣтъ повода согласиться съ этимъ, такъ какъ и при неукороченномъ шагѣ обмотки въ каждомъ нейтральномъ поясѣ располагаются двѣ группы проволокъ съ токами противоположнаго направленія. Самое большее можно указать, что при сравнительно небольшой дугѣ, которую занимаетъ одинъ витокъ, уже небольшой уголъ сдвига щетокъ достаточенъ для того, чтобы перевести индуктирующуюся сторону катушки при коммутированіи въ дѣйствующее поле. Вслѣдствіе небольшого угла сдвига щетокъ, реакція якоря будетъ также мала.

Разсмотримъ теперь дѣйствіе ампервитковъ, расположенныхъ въ полюсной дугѣ β. Послѣдніе называютъ поперечными ампервитками, такъ какъ они образуютъ магнитный потокъ, который идетъ поперекъ якоря. Поперечныя силовыя линіи, которыя можно считать за линіи разсѣянія, замыкаются, какъ указано на фиг. 115 и 116, черезъ воздухъ и полюсы. Наиболѣе густо онѣ располагаются на краяхъ полюса, такъ какъ въ тѣхъ мѣстахъ дѣйствующими оказываются всѣ ампервитки, расположенные передъ полюсной дугой. Какъ можно видѣть, онѣ въ мѣстѣ входа якоря въ раіонъ полюса противодѣйствуютъ магнитному потоку, исходящему изъ полюсовъ,

а въ мѣстѣ выхода усиливаютъ послѣдній. Хотя вслѣдствіе этого не происходитъ никакого ослабленія поля, но зато получается смѣщеніе его, какъ это уже было показано на фиг. 110.

Это смѣщеніе является вреднымъ по двумъ причинамъ: во-первыхъ, въ катушкѣ, которая находится какъ разъ въ наиболѣе сильномъ полѣ, индуктируется чрезмѣрно большая электродвижущая сила, вслѣдствіе чего между соотвѣтствующими сегментами коммутатора можетъ возникнуть искра и такимъ образомъ создать благопріятныя условія для возникновенія сплошного пламени вокругъ коллектора, а во-вторыхъ, поперечное намагничиваніе затрудняетъ коммутированіе. Какъ разъ мѣсто входа обмотокъ якоря въ раіонъ полюса является наиболѣе важнымъ, такъ какъ именно въ этомъ мѣстѣ коротко замкнутая катушка должна находить себѣ



Фиг. 115. Фиг. 116.

для коммутированія безъ искренія необходимое напряженіе магнитнаго поля (см. стат. 55). Если же число поперечныхъ ампервитковъ окажется значительнымъ, то поле въ мѣстѣ входа якоря въ раіонъ полюса будетъ слабымъ. Иногда оно бываетъ даже отрицательнымъ, и машина тогда никогда не сможетъ работать безъ искренія. Можно съ грубымъ приближеніемъ принять, что при барабанномъ якорѣ для коммутированія безъ искренія необходимо имѣть 1 500 силовыхъ линій на квадр. сант., а при кольцевомъ 2 500.

При кольцевомъ якорѣ для коммутированія безъ искренія, какъ видимъ, потребно большее число силовыхъ линій; послѣднее зависитъ только отъ того, что вліяніе поперечныхъ витковъ у кольца больше, чѣмъ у барабана. Причиною этого является, главнымъ образомъ, присутствіе въ поломъ пространствѣ кольца нѣкотораго числа якорныхъ силовыхъ линій.

Вслѣдствіе этого самоиндукція у кольца больше, чѣмъ у барабана, и потому необходимо коммутированіе въ болѣе сильномъ полѣ для того, чтобы за время короткаго замыканія уравновѣсить самоиндукцію.

Если черезъ $\boldsymbol{B}_l$ обозначимъ среднюю плотность силовыхъ линій въ междужелѣзномъ пространствѣ и черезъ $\boldsymbol{B}_q$ плотность силовыхъ линій на краяхъ полюса, образованныхъ поперечными ампервитками, то равнодѣйствующее напряженіе въ мѣстѣ входа обмотокъ якоря получается:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}_l - \boldsymbol{B}_q.$$

Дѣйствующая же магнитодвижущая сила поперечныхъ ампервитковъ равна:

$$X_q = \frac{z \cdot \beta}{360} \cdot \frac{i_a}{2a}.$$

Магнитное сопротивленіе, которое встрѣчаютъ эти поперечные ампервитки, создается, главнымъ образомъ, воздушнымъ промежуткомъ, благодаря чему, на основаніи уравн. (31) стр. 88, получаемъ:

$$\boldsymbol{B}_q = \frac{0{,}4\pi \cdot X_q}{\boldsymbol{l}_l};$$

гдѣ $\boldsymbol{l}_l$ двойное междужелѣзное пространство въ сантиметрахъ.

Магнитодвижущая сила X_l, которая необходима, чтобы прогнать силовой потокъ черезъ междужелѣзное пространство, опредѣляется изъ уравн.:

$$\boldsymbol{B}_l = \frac{0{,}4\,\pi \cdot X_l}{\boldsymbol{l}_l}.$$

Существующую въ дѣйствительности плотность силовыхъ линій въ мѣстѣ входа якоря получаемъ:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}_l - \boldsymbol{B}_q = 0{,}4\,\pi\frac{X_l - X_q}{\boldsymbol{l}_l}.$$

При вышеуказанныхъ практическихъ условіяхъ для работы безъ искренія необходимо:

$$0{,}4\pi \cdot \frac{X_l - X_q}{\boldsymbol{l}_l} \geqq 1\,500 \text{ для барабаннаго якоря}$$

$$0{,}4\pi \cdot \frac{X_l - X_q}{\boldsymbol{l}_l} \geqq 2\,500 \text{ для кольцевого »}$$

Такъ какъ при усиленіи тока въ якорѣ увеличивается вліяніе поперечныхъ ампервитковъ, то этимъ самымъ обусловливается способность машины къ перегрузкѣ. Послѣдняя опредѣляется не только предѣльнымъ нагрѣваніемъ якоря, но также и работой безъ искренія. Поэтому при конструированіи надо прежде всего ограничить поперечное намагничиваніе. Этого можно достигнуть слѣдующими средствами:

1. Согласно уравн. для X_q, выборъ небольшого угла β полюсной дуги является однимъ изъ преимуществъ. Обыкновенно полюсная дуга составляетъ $\frac{2}{3}$ полюснаго дѣленія.

2. Полезнымъ оказывается также небольшое число z проволокъ на якорѣ. Это однако, для полученія требуемой электродвижущей силы, заставляетъ имѣть слишкомъ большой магнитный потокъ.

3. Обусловливаемая этимъ высокая индукція въ воздухѣ (8000—10 000 силовыхъ линій на квадр. сант. у значительныхъ тихоходныхъ машинъ) требуетъ одновременно магнитодвижущую силу X_l большихъ размѣровъ. Благодаря этому легче выполняются вышеприведенныя неравенства.

4. Увеличеніе размѣровъ X_l достигается также увеличеніемъ двойного междужелѣзнаго пространства $\boldsymbol{l}_l$. Это средство очень дѣйствительно, такъ какъ такимъ образомъ одновременно увеличивается знаменатель въ неравенствахъ. Но эта выгода, однако, вызываетъ установку чрезмѣрно большого числа ампервитковъ на электромагнитахъ.

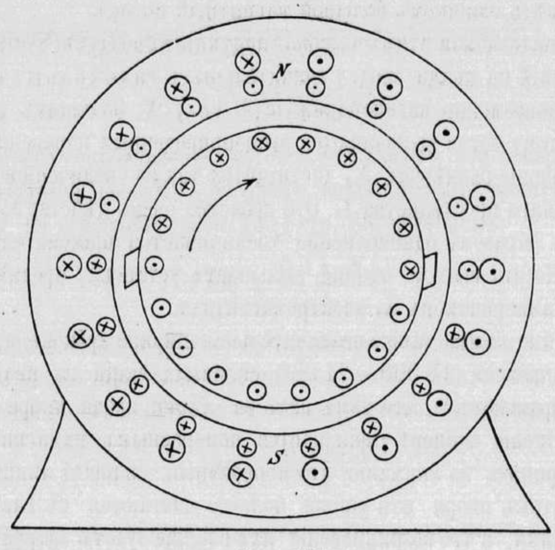
5. Особенно важна также незначительная ширина зубцовъ, зубцы тогда сильно насыщаются (18 000—24 000 силовыхъ линій на квадр. сант.). Конечно, возражаютъ [1]), что какъ разъ въ мѣстѣ входа якоря въ раіонъ полюса насыщеніе зубцовъ уменьшается поперечнымъ намагничиваніемъ. Но нужно принять во вниманіе, что поперечныя силовыя линіи въ мѣстѣ выхода обмотокъ якоря изъ раіона полюса слагаются съ главными силовыми линіями, и что возникновеніе ихъ вообще будетъ затруднено, такъ какъ путь ихъ будетъ въ одномъ мѣстѣ загражденъ.

6. Прохожденіе поперечныхъ силовыхъ линій пытались затруднить также при помощи устройства у электромагнитовъ пазовъ (см. фиг. 116). Но этотъ способъ, кажется, не приводитъ къ желаемымъ результатамъ даже и въ томъ случаѣ, если этотъ пазъ довести до конца и раздѣлить имъ всю магнитную цѣпь на отдѣльныя части. Возможно, что поперечное сѣченіе магнитной цѣпи для поперечнаго магнитнаго потока, проходящаго черезъ пазъ, настолько велико, что пазъ не представляетъ достаточнаго магнитнаго сопротивленія.

7. Прекраснымъ средствомъ для устраненія поперечнаго намагничиванія является устройство компенсаціонной обмотки, предложенной Дери. Индукторный остовъ не имѣетъ ни одного выступающаго полюса и, подобно

[1]) См. Fischer-Hinnen, «Gleichstrommaschinen». 5 Aufl. 1904.

индукціонному (асинхронному) двигателю, представляетъ собою кольцо, имѣющее барабанную обмотку (фиг. 117). Послѣдняя представлена на чертежѣ съ лицевой стороны и ось образуемаго ею магнитнаго поля направляется вертикально сверху внизъ. Подъ угломъ въ 90° къ ней намотана на кольцѣ компенсаціонная обмотка, по которой проходитъ токъ якоря. Какъ видно изъ фиг., эта обмотка вполнѣ уничтожаетъ вліяніе тока въ якорѣ при всѣхъ нагрузкахъ. Вслѣдствіе того, что ось компенсаціонной обмотки сдвинута въ сторону движенія, можно достичь усиленія главнаго магнит-



Фиг. 117.

наго потока. Этимъ уравновѣсится паденіе напряженія при сильной нагрузкѣ, такъ что машина работаетъ, какъ динамо-компаундъ [1]).

Особенно важно, что при обмоткахъ Дери избѣгаютъ сдвига поля и потому слишкомъ большой электродвижущей силы между двумя сегментами коллектора. При турбогенераторахъ, у которыхъ, вслѣдствіе большого числа оборотовъ, приходится расчитывать на большое напряженіе между сегментами, образованія сплошного искренія на коллекторѣ избѣгаютъ часто только устройствомъ компенсаціонной обмотки.

---

[1]) См. Arnold, «Die Gleichstrommaschine». 1902. Bd. I, стр. 405.

55. Коммутированіе безъ искренія.

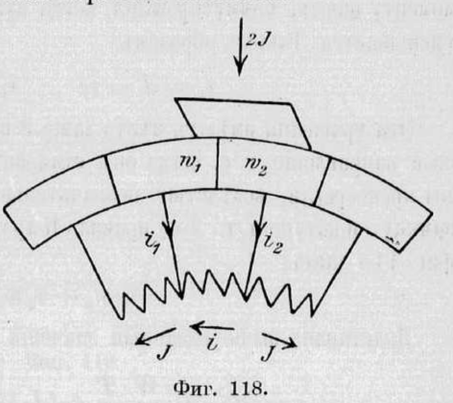
Для выясненія явленій при коммутированіи безъ искренія и для опредѣленія условій, необходимыхъ для работы безъ искренія, мы разсмотримъ только самый простой случай, т. е, когда щетка замыкаетъ на короткое не болѣе двухъ коллекторныхъ пластинъ. Кромѣ того мы будемъ пренебрегать вліяніемъ возможнаго одновременнаго замыканія сосѣднихъ проволокъ другою щеткою противоположнаго знака. Разсмотримъ теперь:

1. Характеръ измѣненія тока короткаго замыканія въ зависимости отъ времени, принимая во вниманіе только сопротивленіе контакта щетокъ, т. е. пренебрегая самоиндукціей.

2. Вліяніе самоиндукціи на токъ короткаго замыканія.

3. Условіе работы безъ искренія при коммутированіи въ нейтральномъ поясѣ.

4. Устраненіе вліянія самоиндукціи перемѣщеніемъ щетокъ или устройствомъ добавочныхъ полюсовъ.



Фиг. 118.

1. Катушка не обладаетъ никакой самоиндукціей. Сопротивленіемъ же катушки и соединительныхъ проводниковъ къ коллектору, вслѣдствіе незначительности его, мы пренебрежемъ. Щетки могутъ располагаться по практической нейтральной линіи, и ихъ ширина равна ширинѣ пластины коллектора. Пусть, далѣе (фиг. 118):

J токъ въ одной вѣтви обмотки якоря,

i измѣняющійся съ теченіемъ времени токъ при короткомъ замыканіи,

i_1 токъ подъ набѣгающимъ концомъ щетки,

i_2 токъ подъ сбѣгающимъ концомъ щетки,

W переходное сопротивленіе щетокъ, т. е. сопротивленіе въ мѣстѣ прикосновенія щетокъ къ коллектору,

w_1 сопротивленіе набѣгающаго конца щетокъ,

w_2 сопротивленіе сбѣгающаго конца щетокъ.

t время, отсчитываемое отъ начала короткаго замыканія,

T продолжительность короткаго замыканія,

Если пренебречь вліяніемъ плотности тока на переходное сопротивленіе щетокъ, то эти сопротивленія w_1 и w_2 обратно пропорціональны поверхностямъ соприкосновенія. Такимъ образомъ:

$$w_1 = W\frac{T}{t},$$

$$w_2 = W\frac{T}{T-t}$$

Токъ $2J$ входитъ изъ сѣти въ щетки и тамъ раздѣляется на 2 неравныя части. Черезъ сопротивленіе w_2, согласно фиг. 118, идетъ токъ J правой части якоря и токъ i короткозамкнутой катушки. Направленіе послѣдняго на фиг. 118 изображено въ томъ положеніи, какъ оно существовало до начала коммутированія. Фиг. 118 соотвѣтствуетъ, слѣдовательно, моменту начала коммутированія, когда существовавшій до той поры токъ уменьшается. Такимъ образомъ:

$$i_1 = J - i, \qquad i_2 = J + i\cdot$$

Эти уравненія имѣютъ мѣсто даже и послѣ того, какъ токъ измѣнитъ свое направленіе, т. е. когда онъ становится отрицательнымъ. Такъ какъ мы пренебрегли, вслѣдствіе незначительности, сопротивленіемъ короткозамкнутой катушки, то 2-ое правило Кирхгофа въ короткозамнутой цѣпи фиг. 118 даетъ:

$$-i_1 w_1 + i_2 w_2 = 0.$$

Подставляя вышеуказанныя значенія i_1, i_2, w_1 и w_2, поучаемъ:

$$-(J-i)\cdot\frac{W\cdot T}{t} + (J+i)\cdot\frac{WT}{T-t} = 0.$$

Опредѣлимъ отсюда i:

$$i = J - 2J\cdot\frac{t}{T}. \quad \dots\dots\dots\dots \quad (a)$$

На фиг. 119 OG—ось абсциссъ, время t нанесено по оси абсциссъ, мгновенныя же значенія тока при короткомъ замыканіи i—по оси ординатъ. Изъ уравненія (а) имѣемъ, напримѣръ, для

$$t = 0 \qquad i = J$$

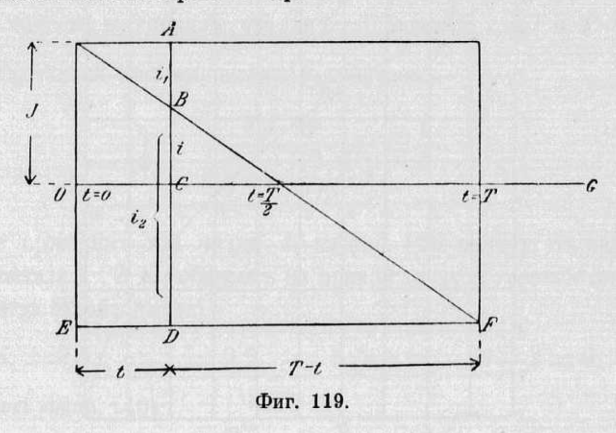
$$t = \frac{T}{2} \qquad i = 0$$

$$t = T \qquad i = -J$$

Такимъ образомъ получаемъ представленную на чертежѣ прямую. Для любого момента времени $t = OC$ имѣемъ:

$$i = BC, \qquad i_1 = J - i = AB, \qquad i_2 = J + i = BD.$$

Ординаты между горизонталью EF и наклонной представляютъ собою, слѣдовательно, токъ i_2 въ сбѣгающихъ концахъ щетокъ. Пусть поверхность соприкосновенія сбѣгающихъ концовъ щетокъ будетъ пропорціональна величинѣ $T-t$. Тогда плотность тока подъ этимъ концомъ щетокъ пропорціональна отношенію $\frac{i_2}{T-t}\cdot$ Такъ какъ это отношеніе, согласно чертежу, постоянно и равно $\frac{2J}{T}$, то отсюда слѣдуетъ, что плотность тока въ любой моментъ времени короткаго замыканія и по всей поверхности щетки постоянна. Вреднаго искренія въ этомъ случаѣ не произойдетъ, такъ какъ токъ въ сбѣгающихъ пластинахъ слабѣетъ пропорціонально уменьшенію поверхности соприкосновенія и доходитъ до нуля. Въ концѣ короткаго замыканія въ катушку входитъ уже токъ $-J$, т. е. переходъ въ новую половину якоря происходитъ при прекращеніи короткаго замыканія безъ измѣненія тока въ самой катушкѣ.



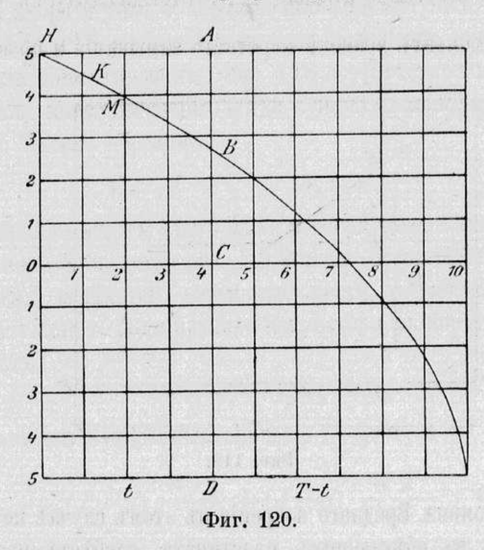
Фиг. 119.

2. Въ дѣйствительности эти явленія происходятъ при менѣе благопріятныхъ условіяхъ, такъ какъ короткозамкнутая катушка образуетъ силовыя линіи, которыя при исчезновеніи прежняго тока и при возникновеніи новаго пересѣкаютъ катушку. Вслѣдствіе этого образуется электродвижущая сила самоиндукціи, которая, съ одной стороны, замедляетъ ослабленіе тока, а съ другой задерживаетъ наростаніе тока противоположнаго направленія. Кривая тока при короткомъ замыканіи представляетъ собою

не прямую, какъ на фиг. 119, а кривую, изогнутую въ сторону нижней горизонтали, какъ указано на фиг. 120. Токъ при короткомъ замыканіи проходитъ черезъ нулевое значеніе уже не въ моментъ $\frac{T}{2}$, а нѣсколько позже.

Для построенія кривой напишемъ 2-ое правило Кирхгофа для короткозамкнутой цѣпи съ самоиндукціей. При этомъ примемъ во вниманіе, что самоиндукція E_s направлена одинаково съ ослабѣвающимъ токомъ i, а въ представленный на чертежѣ моментъ также съ токомъ i_2. Слѣдовательно, получаемъ:

$$E_s = i_2 w_2 - i_1 w_1.$$



Фиг. 120.

Подставивъ вмѣсто E, на основаніи уравн. (35) стр. 102, значеніе $-L\frac{di}{dt}$, а вмѣсто w_1 и w_2 значенія, данныя на стр. 202, получаемъ:

$$-\frac{di}{dt} = \frac{W \cdot T}{L}\left(\frac{i_2}{T-t} - \frac{i_1}{t}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (40)$$

При этомъ $i_2 = J + i$ и $i_1 = J - i$. Рѣшеніе этого дифференціальнаго уравненія (40), не представляетъ трудности, но приводитъ все же къ интегралу, который не разрѣшается простымъ образомъ. Поэтому цѣлесообразнѣе опредѣлить кривую тока короткаго замыканія графическимъ путемъ [1]).

[1]) См. Rothert, «Beitrag zur Theorie der Stromwendung» ETZ. 1902, стр. 865.

Для упрощенія положимъ:

$$T = 10, \qquad J = 5, \qquad L = 1, \qquad W = \frac{1}{10}.$$

Тогда

$$\frac{W \cdot T}{L} = 1.$$

Опредѣлимъ сначала наклонъ кривой для $t = 0$. Для этого момента, согласно фиг. 120, принявъ первую часть кривой за прямую, получимъ:

$$-\frac{di}{dt} = \frac{i_1}{t}.$$

Это значеніе мы подставимъ въ уравненіе (40), изъ котораго опредѣлимъ $\frac{i_1}{t}$, принявъ во вниманіе, что для $t = 0$ будетъ $i_2 = 2J$ и $T - t = T$. Отсюда подставляя числовыя значенія, получаемъ:

$$\frac{i_1}{t} = \frac{2J \cdot W}{L\left(1 + \frac{W \cdot T}{L}\right)} = \frac{1}{2}.$$

Далѣе проводимъ изъ точки H на фиг. 120 прямую съ наклономъ къ горизонтали 1 : 2 и выбираемъ на прямой точку K, соотвѣтствующую $t = 1$. Тогда будемъ имѣть:

$$i_1 = 0{,}5, \qquad i_2 = 9{,}5, \qquad t = 1, \qquad T - t = 9.$$

Поэтому изъ уравн. (40):

$$\frac{di}{dt} = -1\left(\frac{9{,}5}{9} - \frac{0{,}5}{1}\right) = -0{,}555.$$

Послѣднее выраженіе представляетъ собою тангенсъ угла, образованнаго касательною въ точкѣ K съ горизонталью. Поэтому проводимъ черезъ K прямую подъ наклономъ 0,555 : 1 и возьмемъ на ней нѣкоторую точку M, для которой $t = 2$. Отсюда слѣдуетъ:

$$i_1 = 1{,}055, \qquad i_2 = 8{,}945, \qquad t = 2, \qquad T - t = 8.$$

Опредѣляемъ теперь опять $\frac{di}{dt}$ и проводимъ черезъ M соотвѣтствующую прямую. Поступая подобнымъ образомъ и дальше, найдемъ съ достаточной точностью вышеуказанную кривую. Для любого момента времени

t имѣемъ $AB = i_1$, $BC = i$, $BD = i_2$. Наконецъ, значеніе i становится отрицательнымъ. Легко видѣть, что измѣненіе тока во вторую половину короткаго замыканія происходитъ очень быстро.

3. Для установленія условій работы безъ искренія опредѣлимъ плотность тока подъ сбѣгающимъ концомъ щетки. При $t = T$ переходное сопротивленіе будетъ безконечно велико, а токъ i_2 будетъ равенъ нулю. Такъ какъ $T - t$ будетъ также равно нулю, то дробь $i_2 : T - t$, которая пропорціональна плотности тока, приметъ видъ $0 : 0$.

Разсмотримъ теперь случай, когда $\frac{W \cdot T}{L}$ будетъ равно или больше 1.

Если примемъ, теперь, конечную часть кривой короткаго замыканія за прямую, то:

$$\frac{di}{dt}_{(t=T)} = \frac{i_2}{T - t}.$$

Одновременно въ концѣ короткаго замыканія

$$\frac{i_1}{t}_{(t=T)} = \frac{2J}{T}.$$

Подставимъ эти оба значенія въ уравненіе (40) на стр. 204 и, переписавъ его иначе, получимъ

$$\frac{i_2}{T - t}_{(t=T)} = \frac{2J \cdot W}{L\left(\frac{WT}{L} - 1\right)}.$$

Это уравненіе ясно показываетъ, что плотность тока подъ сбѣгающимъ концомъ щетки будетъ тѣмъ больше, чѣмъ ближе выраженіе $\frac{WT}{L} - 1$ приближается къ нулю. Оно при $\frac{WT}{L} = 1$ будетъ безконечно велико. Слѣдовательно, условіемъ для работы безъ искренія будетъ

$$\frac{WT}{L} > 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

Для $\frac{WT}{L} < 1$ послѣднее уравненіе даетъ, повидимому, отрицательное значеніе для плотности тока. Слѣдуетъ принять во вниманіе сдѣланное при нашемъ выводѣ предположеніе, что конечная часть кривой нами принималась за прямую и что отношеніе дифференціаловъ $-\frac{di}{dt}$ равнялось отношенію ординаты къ абсциссѣ, проведенной изъ точки F. Это предположеніе равносильно положенію, что кривая тока пересѣкаетъ нижнюю горизонтальную прямую подъ нѣкоторымъ острымъ угломъ. Но это предположеніе, согласно уравн. (40), больше не имѣетъ мѣста, когда $\frac{W \cdot T}{L}$ будетъ меньше единицы. Въ этомъ случаѣ $-\frac{di}{dt}$ будетъ всегда меньше и никогда не будетъ равно $\frac{i_2}{T - t}$, и уравненіе (40) будетъ выполняться только потому, что какъ $-\frac{di}{dt}$, такъ и $\frac{i_2}{T - t}$ будутъ безконечно велики. Тогда кривая тока пересѣчетъ нижнюю горизонтальную прямую подъ прямымъ угломъ. Такимъ образомъ, въ концѣ короткаго замыканія мы получаемъ тѣ же соотношенія, что и у вершины параболы, гдѣ $\frac{dy}{dx}$ не равно $\frac{y}{x}$, а $\frac{1}{2} \cdot \frac{y}{x}$, и гдѣ кривая точно также пересѣкаетъ ось абсциссъ подъ прямымъ угломъ.

Слѣдовательно, мы приходимъ къ результату, что для $\frac{W \cdot T}{L} \leqq 1$ плотность тока у сбѣгающаго конца щетки безконечна. Одновременно и $-\frac{di}{dt}$ представляетъ собою безконечность. Вслѣдствіе этого уже въ концѣ короткаго замыканія электродвижущая сила $-L \cdot \frac{di}{dt}$ принимаетъ очень значительные размѣры, и такимъ образомъ пробьетъ воздушный слой у сбѣгающей пластины (образованіе искренія).

Умножимъ обѣ части неравенства $\frac{WT}{L} > 1$ на $2J$; тогда получимъ:

$$2J \cdot W > \frac{2J \cdot L}{T}.$$

Лѣвая часть этого неравенства представляетъ собою омическую потерю напряженія въ переходномъ сопротивленіи щетокъ при равномѣрной плотности тока; правая же часть, согласно стр. 103,—среднюю электродвижущую силу самоиндукціи въ короткозамкнутой катушкѣ. Слѣдовательно, условіемъ работы безъ искренія является превышеніе омической потери напряженія надъ средней электродвижущей силой самоиндукціи. Такъ какъ на практикѣ потеря вольтъ въ угольной щеткѣ составляетъ около одного вольта, то отсюда слѣдуетъ, что электродвижущая сила са-

моиндукціи должна быть меньше 1 вольта, если не имѣется какихъ либо условій, уничтожающихъ вліяніе самоиндукціи.

Для опредѣленія коэффиціента самоиндукціи необходимо число силовыхъ линій, образуемыхъ въ катушкѣ токомъ въ одинъ амперъ, умножить на число витковъ катушки или же на число витковъ, замкнутыхъ на короткое и послѣдовательно соединенныхъ катушекъ. Зачастую проволока, которая расположена въ одномъ и томъ же каналѣ и по которой проходитъ токъ по одному и тому же направленію, замыкается на короткое противоположною по знаку щеткою. Въ этомъ случаѣ самоиндукція повышается, и для длины проволоки, заключенной внутри канала, необходимо принять двойную величину. Впрочемъ, расчетъ значительно упрощается тѣмъ, что, согласно Гобарту, на каждый амперъ и сантиметръ проволоки, утопленной въ желѣзѣ, принимаютъ 4—6 силовыхъ линій, а на каждый амперъ и сантиметръ открыто расположеннаго проводника 0,8 силовыхъ линій.

Насколько измѣнятся условія при одновременномъ соприкосновеніи щетки болѣе чѣмъ съ двумя сегментами, путемъ расчета едва ли можно установить. Конечно, благодаря широкой щеткѣ увеличится время коммутированія, но одновременно въ той же мѣрѣ возрастетъ число короткозамкнутыхъ катушекъ, т. е. магнитный потокъ, пересѣкающій теперь одну единственную катушку. Поэтому расчетъ ведутъ, для упрощенія, принимая ту же самоиндукцію и время коммутированія, что и при узкой щеткѣ (ср. Hobart, ETZ 1903, S. 821).

Это теоретически выведенное условіе работы безъ искренія при угольныхъ щеткахъ прекрасно согласуется съ практическими данными. При мѣдныхъ же щеткахъ, сопротивленіе которыхъ очень мало, вышеуказанное условіе не выполняется, но, несмотря на это, машина все же можетъ работать безъ искренія. Это объясняется навѣрно тѣмъ, что при малѣйшемъ искреобразованіи переходное сопротивленіе мѣдныхъ щетокъ быстро возрастаетъ.

Изъ уравненія (41) вытекаетъ прежде всего, что для полученія работы безъ искренія цѣлесообразнымъ оказывается имѣть большее переходное сопротивленіе щетокъ или включеніе между катушкой и коллекторомъ успокоительнаго (балластнаго) сопротивленія. Поэтому обыкновенно угольнымъ щеткамъ отдаютъ преимущество. Только для машинъ съ очень незначительнымъ напряженіемъ и сильнымъ токомъ (для электролитическихъ цѣлей) угольныя щетки, вслѣдствіе большой потери при нихъ вольтажа, непригодны.

Далѣе, неблагопріятное вліяніе на работу безъ искренія оказываетъ большее число оборотовъ, такъ какъ продолжительность коммутированія въ этомъ случаѣ очень незначительна. Поэтому построеніе турбогенераторовъ постояннаго тока представляетъ большія трудности. Въ прежнее время эти трудности увеличивались еще тѣмъ, что отказывались, обращая вниманіе на большія потери на треніе, отъ примѣненія угольныхъ щетокъ.

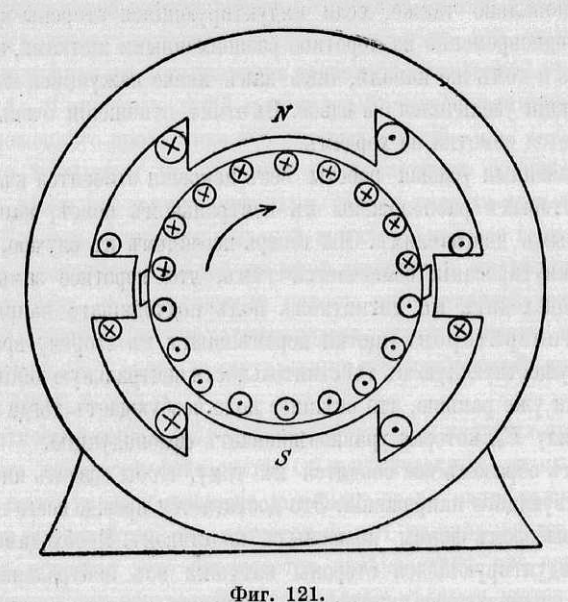
Но особенно важнымъ является то обстоятельство, что коэффиціентъ самоиндукціи короткозамкнутой катушки будетъ въ достаточной степени незначительнымъ. Поэтому каналы дѣлаютъ открытыми и каждую индуктирующуюся сторону катушки устраиваютъ въ видѣ одного стержня. Очень раціонально также, если индуктирующіяся стороны катушки, замкнутыя одновременно на короткое разноименными щетками, не находятся въ одномъ и томъ же каналѣ, такъ какъ иначе кажущійся коэффиціентъ самоиндукціи увеличился бы вдвое. Въ этомъ отношеніи очень раціональною является обмотка по хордамъ.

4. Указанныя условія работы безъ искренія относятся къ машинамъ, щетки которыхъ расположены въ нейтральномъ поясѣ, напримѣръ, къ реверсивнымъ двигателямъ. Мы теперь перейдемъ къ случаю, когда процессъ коммутированія облегчается тѣмъ, что короткое замыканіе само собой происходитъ въ магнитномъ полѣ подходящаго напряженія. Для этого у генераторовъ щетки перемѣщаютъ въ сторону вращенія впередъ за существующую въ дѣйствительности нейтральную линію, фиг. 112. Мы видѣли уже раньше, что внѣшнее поле возбуждаетъ тогда электродвижущую силу E_k, которая уравновѣшиваетъ самоиндукцію.

Такимъ образомъ все сводится къ тому, чтобы создать внѣшнее поле соотвѣтствующаго напряженія. Это достигается прежде всего соотвѣтствующимъ выборомъ формы полюсныхъ надставокъ. Необходимо, чтобы переходъ индуктирующейся стороны катушки изъ нейтральнаго поля въ активное происходилъ постепенно. Искреніе щетокъ самоустраняется также закругленіемъ краевъ полюса. Употребленіе полюсныхъ надставокъ въ видѣ параллелограмма, какъ это имѣетъ мѣсто обыкновенно у машинъ Шукерта, также оказывается средствомъ, облегчающимъ установку щетокъ. Напротивъ, употреблявшіяся прежде конструкціи связанныхъ между собою полюсныхъ надставокъ, напримѣръ, въ машинахъ Доливо-Добровольскаго, теперь почти совершенно оставлены. Хотя паденіе силы внѣшняго поля къ нейтральному поясу въ этихъ машинахъ постепенное, но какъ разъ та часть поля, въ которой происходитъ коммутированіе, у нихъ очень сильно измѣняется поперечнымъ намагничиваніемъ. Подобная конструкція была допустима, пока мирились съ перестановкою щетокъ во время работы, но теперь къ машинѣ предъявляютъ требованіе, чтобы она

работала между холостымъ ходомъ и перегрузкой въ 25% безъ перестановки щетокъ и въ то же время не давала искренія.

Еще болѣе совершенно уравновѣшивается самоиндукція въ короткозамкнутыхъ катушкахъ при помощи вспомогательныхъ полюсовъ, такъ называемыхъ добавочныхъ полюсовъ, которые располагаются въ нейтральномъ поясѣ (фиг. 121). Они проходятся главнымъ токомъ такимъ образомъ, что въ мѣстѣ коммутированія съ одной стороны нейтрализуется поперечное поле, создаваемое якоремъ, а съ другой стороны создается добавочное поле коммутированія.



Фиг. 121.

Такимъ образомъ число ампервитковъ на добавочныхъ полюсахъ должно быть больше числа ампервитковъ якоря на каждую пару полюсовъ.

На фиг. 121 ясно видно, какъ ампервитки добавочныхъ полюсовъ противодѣйствуютъ ампервиткамъ якоря. Прекрасные результаты, достигаемые при примѣненіи добавочныхъ полюсовъ, объясняются тѣмъ, что съ увеличеніемъ нагрузки, слѣдовательно, и силы тока, возрастаютъ съ одной стороны поперечное намагничиваніе, а съ другой стороны магнитодвижущая сила обмотки добавочныхъ полюсовъ, проходимой главнымъ токомъ. Въ силу этого за послѣднее время добавочные полюсы находятъ себѣ все больше и больше примѣненія.

Чтобы уяснить вліяніе той части поля, въ которой происходитъ коммутированіе, разсмотримъ два особенно простыхъ случая. Мы видѣли выше въ пунктѣ 1, что постоянная плотность тока подъ щетками, т. е. прямолинейное очертаніе кривой тока при короткомъ замыканіи, выгодно. Предположимъ теперь, что вслѣдствіе встрѣчныхъ другъ другу дѣйствій самоиндукціи и индуктируемой извнѣ электродвижущей силы получается прямолинейное очертаніе кривой. Въ этомъ случаѣ постоянная величина $\frac{di}{dt}$, согласно фиг. 119, равна $-\frac{2J}{T}$, и въ каждый моментъ:

$$E_s = -L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{2J}{T}.$$

Индуктируемая извнѣ электродвижущая сила E_k должна все время быть постоянной, т. е. для полученія прямолинейнаго очертанія кривой и постоянной плотности тока подъ щетками, короткое замыканіе должно происходить за все время T въ равномѣрномъ внѣшнемъ полѣ соотвѣтствующей силы [1]). При этомъ теоретически самоиндукція можетъ быть сколь угодно большой. Однако слѣдуетъ замѣтить, что практически такое поле недостижимо, и что напряженіе поля коммутированія при увеличеніи нагрузки уменьшается поперечнымъ намагничиваніемъ якоря, если у машины не имѣется добавочныхъ полюсовъ или компенсаціонной обмотки. Особенно выгоднымъ случаемъ будетъ тотъ, при которомъ плотность тока подъ сбѣгающимъ концомъ щетки въ моментъ схода съ пластины уже становится равною нулю. Для полученія необходимыхъ условій для такого случая примѣнимъ 2 законъ Кирхгофа. Тогда получимъ:

$$E_s - E_k = i_2 w_2 - i_1 w_1.$$

На основаніи предыдущаго:

$$E_s = -L\frac{di}{dt} \text{ и } i_2 w_2 - i_1 w_1 = WT\left(\frac{i_2}{T-t} - \frac{i_1}{t}\right).$$

При предположеніи, что послѣднюю часть кривой короткаго замыканія можно разсматривать за прямую, получаемъ:

$$\frac{i_2}{T-t}_{(t=T)} = -\frac{di}{dt}, \quad \frac{i_1}{t}_{(t=T)} = \frac{2J}{T}.$$

[1]) Ст. Pichelmeyer, ETZ. 1903, стр. 1081.

Поэтому законъ Кирхгофа принимаетъ слѣдующій видъ:

$$L \cdot \frac{i_2}{T-t} - E_k = WT \cdot \left(\frac{i_2}{T-t} - \frac{2J}{T} \right).$$

Если опредѣлимъ изъ этого уравненія $\frac{i_2}{T-t}$, которое пропорціонально плотности тока, то получаемъ:

$$\frac{i_2}{T-t}_{(t=T)} = \frac{2JW - E_k}{WT - L}.$$

Для $\frac{WT}{L} > 1$ плотность тока подъ сбѣгающимъ концомъ щетки равна 0, когда индуктирующаяся извнѣ электродвижущая сила $E_k = 2JW$, т. е. какъ разъ достаточная для покрытія потери вольтъ въ щеткахъ.

Какъ дѣло обстоитъ, когда $\frac{WT}{L} = 1$,— сказать трудно. На основаніи этого уравненія, повидимому, плотность тока въ этомъ случаѣ должна стать безконечной. Но это предположеніе противорѣчитъ тому, что при помощи соотвѣтствующаго добавочнаго поля можно уничтожить вліяніе любой самоиндукціи и получить кривую тока въ видѣ прямой.

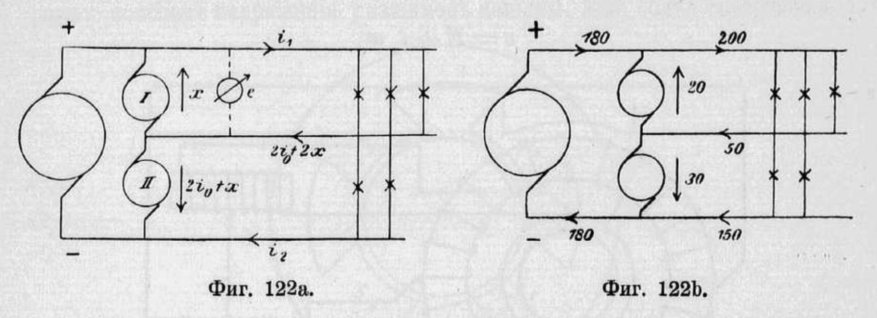
56. Дѣлитель напряженія.

Выгода дѣленія напряженія была указана на стр. 34. Равнымъ образомъ тамъ же былъ указанъ первый и простой способъ дѣленія напряженія при помощи двухъ включенныхъ послѣдовательно генераторовъ. Но такъ какъ двѣ малыя машины обходятся дороже одной большой, то стали примѣнять рядъ другихъ способовъ дѣленія напряженія.

Особенно простымъ оно является тогда, когда вмѣстѣ съ машиною параллельно работаетъ батарея аккумуляторовъ. Въ этомъ случаѣ средній проводъ просто присоединяется къ среднему пункту батареи. Однако при этомъ является то неудобство, что обѣ части батареи нагружаются неравномѣрно.

Въ качествѣ дѣлителя напряженія можно примѣнять также два заклиненные на одномъ валу и соединенные послѣдовательно электродвигателя (фиг. 122a). При одинаковой нагрузкѣ обѣихъ половинъ сѣти оба двигателя работаютъ въ холостую, и при одинаковой конструкціи и возбужденіи все напряженіе машины распредѣляется одинаково на оба двигателя. Если же сѣть, какъ представлено на фигурѣ, нагружена неодинаково, то машина I работаетъ какъ генераторъ, посылая добавочный токъ въ верхнюю поло-

вину сѣти. Въ двигатель II при этомъ входитъ столько тока, сколько необходимо его на холостую работу обоихъ двигателей и на полезную работу двигателя I, какъ генератора. Для установленія соотношеній предположимъ, что омическимъ сопротивленіемъ обоихъ двигателей можно пренебречь. Пусть i_0 будетъ токъ при холостомъ ходѣ каждаго двигателя при равномѣрной нагрузкѣ сѣти и e напряженіе каждой половины сѣти. Тогда мощность при холостой работѣ для добавочныхъ машинъ будетъ $2\,e \cdot i_0$. Если же машина I является генераторомъ и доставляетъ токъ x, то ея мощность будетъ $e \cdot x$. Машина II, работающая, какъ двигатель, потребляетъ, слѣдовательно, при напряженіи e мощность $2\,e \cdot i_0 + e \cdot x$. Сила тока во II машинѣ тогда $2\,i_0 + x$. Согласно 1 закону Кирхгофа, токъ



Фиг. 122a. Фиг. 122b.

въ среднемъ проводникѣ тогда будетъ $2\,i_0 + 2\,x$. Въ то же время это является разностью между токами i_1 и i_2. Отсюда слѣдуетъ:

$$i_1 - i_2 = 2\,i_0 + 2\,x$$

или

$$x = \frac{i_1 - i_2}{2} - i_0.$$

Положимъ, напримѣръ, $i_1 = 200$, $i_2 = 150$, $i_0 = 5$; тогда токъ генератора I будетъ:

$$x = \frac{200 - 150}{2} - 5 = 20.$$

Двигатель II потребляетъ токъ:

$$x + 2i_0 = 20 + 10 = 30$$

и сила тока главной машины, согласно фиг. 122b, будетъ равна 180 амперамъ.

Какъ будетъ указано въ статьѣ 63, въ двигателѣ индуктируется противодѣйствующая электродвижущая сила, которая, если пренебречь со-

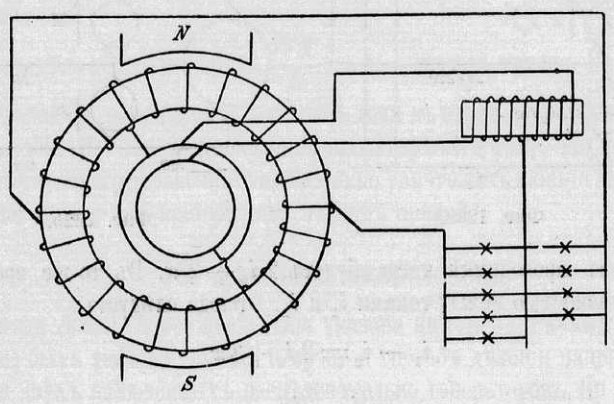
противленіемъ якоря, равна и по направленію прямо противоположна напряженію у зажимовъ. Такъ какъ машины I и II по конструкціи, возбужденію и числу оборотовъ одинаковы, то электродвижущія силы ихъ будутъ также одинаковы. Поэтому напряженія у зажимовъ будутъ также равны между собою и дѣленіе напряженія въ этомъ случаѣ будетъ совершеннымъ.

Въ дѣйствительности же на результатъ оказываетъ вліяніе потери напряженія въ якорѣ, такъ какъ напряженіе у зажимовъ добавочной машины, работающей въ качествѣ генератора, опредѣляется уравненіемъ:

$$e = E - i_a w_a,$$

а напряженіе у машины, работающей въ качествѣ двигателя уравненіемъ:

$$e = E + i_a w_a.$$



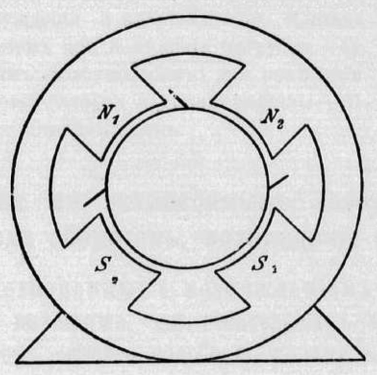
Фиг. 123.

Такъ какъ генераторъ включенъ на болѣе нагруженную половину цѣпи, то эта половина имѣетъ менѣе значительное напряженіе. Можно уменьшить эту разность путемъ возбужденія отдѣльныхъ машинъ отъ непримыкающихъ къ нимъ половинъ сѣти или путемъ усиленія поля генератора и ослабленія поля двигателя токомъ средняго провода [1]).

Особенно простымъ является дѣленіе напряженія при помощи реакціонной катушки Доливо-Добровольскаго (фиг. 123). Въ этомъ случаѣ двѣ точки обмотки, которыя отстоятъ другъ отъ друга на полюсное дѣленіе, соединяются съ контактными кольцами. Къ послѣднимъ присоединяется, такъ называемая, реакціонная катушка, которая намотана на желѣзный

[1]) См. Arnold, «Die Gleichstrommaschine», II Bd. II Aufl. 1907, стр. 550.

стержень. Черезъ обмотку реакціонной катушки проходитъ тогда перемѣнный токъ; послѣдній образуетъ силовыя линіи, которыя, возникая и исчезая, пересѣкаются витками катушки. Индуктирующаяся въ послѣдней вслѣдствіе этого электродвижущая сила, какъ это будетъ указано при разсмотрѣніи трансформаторовъ, дѣйствуетъ на встрѣчу этому току и позволяетъ притекать только такому количеству тока, которое необходимо для намагничиванія. Вслѣдствіе этого перемѣнный токъ оказывается очень незначительнымъ, тогда какъ постоянный токъ можетъ свободно протекать черезъ реакціонную катушку. Если, теперь, средній проводъ присоединить къ средней точкѣ обмотки реакціонной катушки, то между нимъ и каждымъ изъ внѣшнихъ проводниковъ на фигурѣ будетъ имѣть мѣсто напряженіе, равное половинѣ напряженія у зажимовъ машины. Еще болѣе совершенно



Фиг. 124.

дѣйствуетъ дѣленіе напряженія по Зенгелю*), при которомъ три точки, отстоящія другъ отъ друга на $^2/_3$ полюснаго дѣленія, соединяются съ контактными кольцами. Тогда три реакціонныя катушки соединяютъ звѣздой, къ средней или нулевой точкѣ которой присоединяютъ средній или нулевой проводъ (ср. соединеніе звѣздой при трехфазномъ токѣ).

Своеобразно разрѣшаетъ эту задачу дѣленія напряженія Деттмаръ, путемъ установки между главными щетками вспомогательныхъ **) (фиг. 124). Такъ какъ послѣднія по временамъ замыкаютъ на короткое два сегмента коллектора и это короткое замыканіе не должно происходить въ сильномъ полѣ, то въ этомъ мѣстѣ необходимо ослабить самое поле, т. е. раздѣлить полюсъ посрединѣ на двѣ части. Слѣдовательно, полюса N_1 и N_2 въ дѣ-

[1]) E. T. Z. 1898, стр. 544.
[2]) ETZ. 1897, стр. 55 и 230.

ствительности считаютъ за одинъ. Для того чтобы напряженіе одной половины сѣти можно было регулировать независимо отъ другой, необходимо обмотки N_1 и S_1, а также N_2 и S_2 включить послѣдовательно, такъ какъ послѣдовательно же соединены и проволоки, расположенныя на барабанѣ діаметрально-противоположно.

Не трудно видѣть, что поперечнымъ намагничиваніемъ ослабится напряженіе въ одной половинѣ сѣти и усилится въ другой половинѣ. Въ данномъ случаѣ, какъ и въ случаѣ фиг. 122а, слѣдуетъ питать возбуждающую обмотку для электродвижущей силы одной половины сѣти отъ другой половины ея.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

57. Динамомашина съ независимымъ возбужденіемъ при измѣненіи числа оборотовъ, возбужденія и нагрузки.

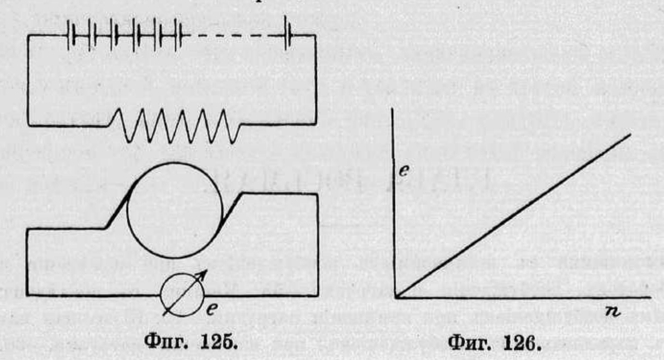
У машинъ съ независимымъ возбужденіемъ обмотка электромагнитовъ питается внѣшнимъ, самостоятельнымъ источникомъ тока (фиг. 125). Разсмотримъ сначала подобную машину во время холостого ея хода, оставляя постояннымъ возбужденіе и измѣняя только число оборотовъ Согласно уравн. (38) на стр. 162, электродвижущая сила въ этомъ случаѣ равна:

$$E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8}.$$

Такъ какъ въ правой части этого уравненія n будетъ единственной перемѣнной величиною, то, слѣдовательно, электродвижущая сила пропорціональна числу оборотовъ. Если отложить наблюдаемыя числа оборотовъ по оси абсциссъ, а напряженія по оси ординатъ, то получимъ прямую (фиг. 126).

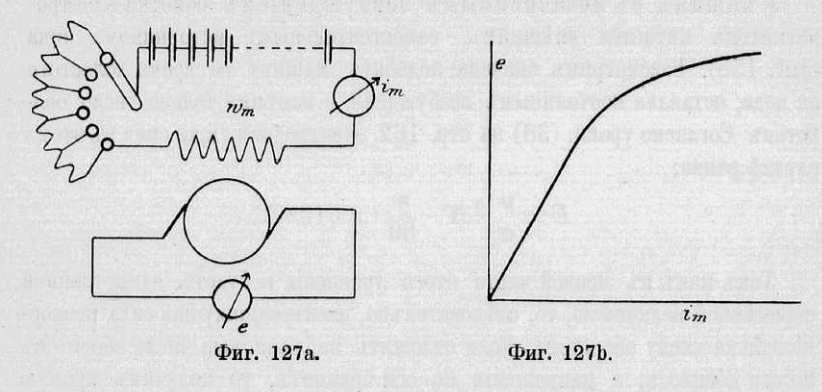
Оставимъ, теперь, число оборотовъ постояннымъ, а будемъ измѣнять лишь посредствомъ включенія добавочнаго сопротивленія намагничивающій токъ (фиг. 127а). Если отложимъ теперь по оси абсциссъ, фиг. 127b, силу намагничивающаго тока или число ампервитиковъ электромагнитовъ, а отсчитываемое напряженіе по оси ординатъ, мы получимъ характеристику

холостого хода. Какъ видимъ, напряженіе возрастаетъ сначала пропорціонально намагнивающему току, а затѣмъ, при насыщеніи желѣза, усиленіе намагничивающаго тока вызываетъ только незначительное увеличеніе магнитнаго потока и напряженія.



Фиг. 125. Фиг. 126.

Напряженіе при холостомъ ходѣ равно электродвижущей силѣ. Такъ какъ послѣдняя пропорціональна магнитному потоку N, то ординаты фиг. 127b представятъ намъ въ соотвѣтствующемъ масштабѣ размѣры магнитнаго потока N. Поэтому вполнѣ возможно принимать характеристику холостого хода за кривую намагничиванія машины.

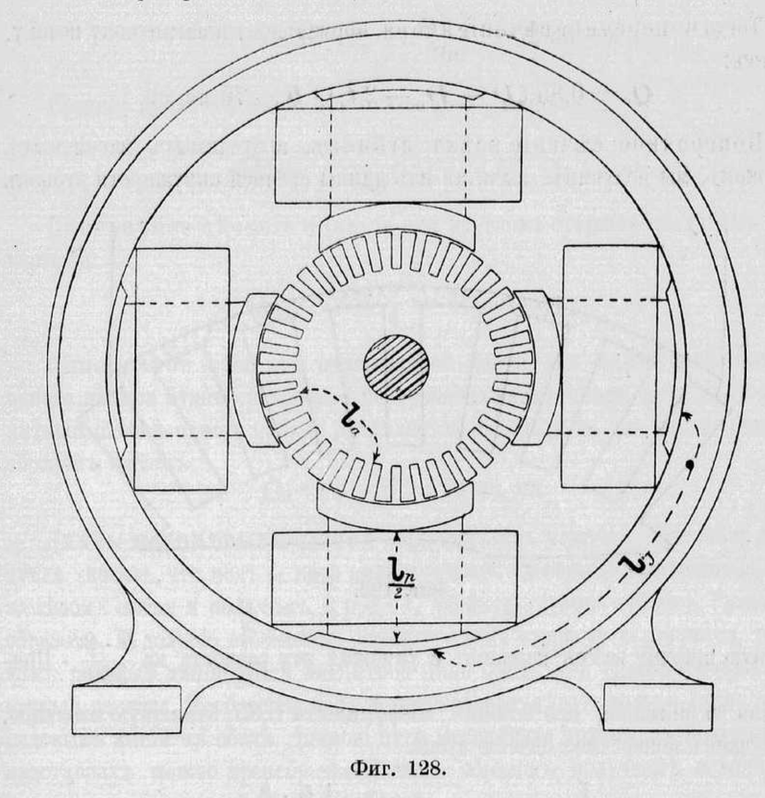


Фиг. 127а. Фиг. 127b.

Однако между разсмотрѣнной уже раньше кривой намагничиванія и характеристикой холостого хода имѣется существенная разница. Абсциссы кривой намагничиванія представляютъ собою ампервитки на каждый сантиметръ пути, а абсциссы характеристики соотвѣтствуютъ ампервиткамъ для всего пути магнитнаго потока. Равнымъ образомъ, ординаты кривой намагничиванія даютъ число силовыхъ линій на квадр.

сант., а ординаты характеристики весь магнитный потокъ черезъ якорь или индуктируемое напряженіе.

Перейдемъ теперь къ предварительному опредѣленію характеристики холостого хода какой-либо имѣющейся машины и опредѣлимъ для этой цѣли поперечныя сѣченія пути магнитнаго потока въ якорѣ, зубцахъ, междужелѣзномъ пространствѣ, полюсныхъ стержняхъ и ободѣ. Пусть, согласно



Фиг. 128.

фиг. 128, вычерченной въ масштабѣ 1 : 4, и фиг. 129, вычерченной въ масштабѣ 1 : 1:

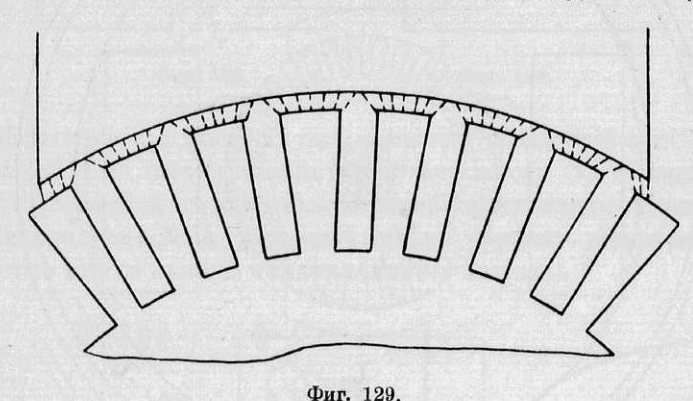
діаметръ якоря	D =	15 см.
діаметръ внутренняго полаго пространства (при сплошномъ якорѣ діаметръ вала) . . .	D_0 =	3,5 »
длина якоря (вдоль оси)	b =	11 »
глубина канала	t_1 =	2 »
ширина »	t_2 =	0,5 »

число каналовъ . . . . $S = 36$
разстояніе между якоремъ и полюсомъ . . . $= 0{,}2$ см.
уголъ обхвата якоря полюсомъ . . . . $\beta = 70^\circ$
часть боковой поверхности якоря, занятая бумажной изоляціей, въ процентахъ . . . . $= 15\%$
Поперечное сѣченіе обода машины . . . . . . $= 37$ кв. см.

Тогда поперечное сѣченіе якоря, нормальное къ магнитному потоку, будетъ:

$$Q_a = 0{,}85\,(D - D_0 - 2\,t_1) \cdot b = 70 \text{ кв. см.}$$

Поперечное сѣченіе всѣхъ зубцовъ, проходимыхъ магнитнымъ потокомъ, мы получимъ, вычитая изъ длины средней окружности зубцовъ



Фиг. 129.

полную ширину всѣхъ каналовъ и умножая эту разность на $\frac{b \cdot \beta}{360}$. Принимая во вниманіе, при помощи коэффиціента 0,85, бумажную изоляцію, получаемъ поперечное сѣченіе зубца:

$$Q_z = 0{,}85 \left[(D - t_1)\,\pi - S \cdot t_2 \right] \frac{b \cdot \beta}{360} = 41{,}5 \text{ кв. см.}$$

Поперечное сѣченіе междужелѣзнаго пространства Q_l будетъ среднее ариѳметическое изъ боковой поверхности полюсной дуги и боковой поверхности желѣза якоря, приходящагося противъ полюса, такъ какъ силовыя линіи входятъ въ якорь какъ представлено на фиг. 129. Если, теперь, двойной воздушный слой будетъ:

$$l_l = 0{,}4 \text{ см.},$$

то боковая поверхность полюсной дуги:

$$\left(D + l_l \right) \pi \cdot \frac{\beta \cdot b}{360} = 104 \text{ кв. см.}$$

Боковая поверхность желѣза якоря, приходящаяся противъ полюса при 36 каналахъ, будетъ:

$$\left(D\,\pi - 36 \cdot t_2 \right) \cdot \frac{b \cdot \beta}{360} = 62 \text{ кв. см.}$$

Среднее ариѳметическое изъ этихъ двухъ величинъ:

$$Q_l = \frac{104 + 62}{2} = 83 \text{ кв. см.}$$

Поперечное сѣченіе полюса при кругломъ стержнѣ получаемъ изъ чертежа:

$$Q_p = 7{,}4^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 43 \text{ кв. сант.}$$

Поперечное сѣченіе замыкающей части для магнитнаго потока одного полюса будетъ удвоенное поперечное сѣченіе обода, такъ какъ магнитный потокъ одного полюса раздѣляется въ ободѣ на двѣ части. Такимъ образомъ имѣемъ:

$$Q_J = 2 \cdot 37 = 74 \text{ кв. см.}$$

Длины магнитныхъ цѣпей получимъ изъ чертежа, при чемъ слѣдуетъ указать, что подъ l_l надо подразумѣвать удвоенное разстояніе между желѣзомъ якоря и полюсомъ, а подъ l_z двойную глубину зубцовъ. Равнымъ образомъ, l_p должно обозначать двойную длину стержня сердечника, такъ какъ силовыя линіи одной магнитной цѣпи проходятъ сквозь сѣверный и южный полюсы. Наоборотъ, подъ l_J надо подразумѣвать только длину пути силовыхъ линій въ ободѣ. Длиною пути магнитнаго потока въ полюсныхъ надставкахъ можно пренебречь. Такимъ образомъ получаемъ величины, указанныя въ нижеслѣдующей таблицѣ:

Якорь (Якорное желѣзо)	Зубцы (Якорное желѣзо)	Междужелѣзное пространство	Полюсныя надставки. (Кованое желѣзо)	Ободъ (Чугунъ)
$Q_a = 70$	$Q_z = 41{,}5$	$Q_l = 83$	$Q_p = 43$	$Q_J = 74$
$l_a = 7$	$l_z = 4$	$l_l = 0{,}4$	$l_p = 12{,}5$	$l_J = 22$

Опредѣлимъ теперь ампервитки для каждой отдѣльной части магнитной цѣпи. Для этой цѣли возьмемъ для N нѣсколько произвольныхъ зна-

ченій и раздѣлимъ ихъ на поперечное сѣченіе соотвѣтствующей части цѣпи. Для опредѣляемыхъ такимъ образомъ индукцій **B** изъ фиг. 61 получимъ соотвѣтствующія имъ числа ампервитковъ на каждый сантиметръ пути $\left(\frac{X}{l}\right)$. Для полученія ампервитковъ для всей данной части магнитной цѣпи слѣдуетъ послѣднее умножить на длину пути магнитнаго потока въ данной части.

При опредѣленіи ампервитковъ, необходимыхъ для сердечниковъ электромагнитовъ и обода, мы должны принять во вниманіе, что магнитный потокъ N_m въ сердечникахъ электромагнитовъ, вслѣдствіе разсѣянія, долженъ быть больше магнитнаго потока N въ якорѣ. Обозначимъ отношеніе магнитнаго потока въ электромагнитахъ къ потоку въ якорѣ черезъ σ и предположимъ:

$$\sigma = \frac{N_m}{N} = 1{,}2,$$

откуда получаемъ:

$$N_m = 1{,}2\ N,$$

1. Якорь.

$$N = 0{,}2 \qquad 0{,}4 \qquad 0{,}5 \qquad 0{,}6 \cdot 10^6$$

$$B_a = \frac{N}{Q_a} = \frac{N}{70} = 2\,850 \qquad 5700 \qquad 7150 \qquad 8550$$

$\left(\frac{X}{l}\right)_a$ изъ кривой для якорнаго желѣза . . . . $= 0{,}5 \qquad 1{,}1 \qquad 1{,}4 \qquad 1{,}8$

$$X_a = \left(\frac{X}{l}\right) \cdot l_a = 7\left(\frac{X}{l}\right)_a = 3{,}5 \qquad 7{,}7 \qquad 9{,}8 \qquad 12{,}6$$

2. Зубцы.

$$N = 0{,}2 \qquad 0{,}4 \qquad 0{,}5 \qquad 0{,}6 \cdot 10^6$$

$$B_z = \frac{N}{Q_z} = \frac{N}{41{,}5} = 4800 \qquad 9650 \qquad 12000 \qquad 14400$$

$\left(\frac{X}{l}\right)_a$ изъ кривой для якорнаго желѣза . . . . $= 0{,}8 \qquad 2{,}3 \qquad 4 \qquad 9$

$$X_z = \left(\frac{X}{l}\right)_z \cdot l_z = 4\left(\frac{X}{l}\right)_z = 3{,}2 \qquad 9{,}2 \qquad 16 \qquad 36$$

3. Междужелѣзное пространство.

Для воздуха имѣетъ мѣсто основное уравненіе (31) стр. 88:

$$B_l = H_l = \frac{0{,}4\,\pi \cdot X_l}{l_l}$$

$$X_l = \frac{B_l \cdot l_l}{0{,}4\,\pi} = 0{,}8\ B_l \cdot l_l$$

Слѣдовательно имѣемъ:

$$N = 0{,}2 \qquad 0{,}4 \qquad 0{,}5 \qquad 0{,}6 \cdot 10^6$$

$$B_l = \frac{N}{Q_e} = \frac{N}{83} = 2400 \qquad 4820 \qquad 6020 \qquad 7220$$

$$X_l = 0{,}8\ B_l \cdot l_l = 0{,}32\ B_l = 770 \qquad 1540 \qquad 1930 \qquad 2310$$

4. Сердечники электромагнитовъ.

тогда имѣемъ:

$$N = 0{,}2 \qquad 0{,}4 \qquad 0{,}5 \qquad 0{,}6 \cdot 10^6$$

$$N_m = 1{,}2\ N = 0{,}24 \qquad 0{,}48 \qquad 0{,}6 \qquad 0{,}72 \cdot 10^6$$

$$B_p = \frac{N_m}{Q_p} = \frac{N_m}{43} = 5\,600 \qquad 11\,200 \qquad 14\,000 \qquad 16\,800$$

$\left(\frac{X}{l}\right)_p$ изъ кривой для кованаго желѣза. . . . . $= 1{,}6 \qquad 5 \qquad 14 \qquad 100$

$$X_p = \left(\frac{X}{l}\right)_p \cdot l_p = 12{,}5\left(\frac{X}{l}\right)_p = 20 \qquad 62{,}5 \qquad 175 \qquad 1\,250$$

5. Замыкающая часть (ободъ).

$$N = 0{,}2 \qquad 0{,}4 \qquad 0{,}5 \qquad 0{,}6 \cdot 10^6$$

$$N_m = 1{,}2\ N = 0{,}24 \qquad 0{,}48 \qquad 0{,}6 \qquad 0{,}72 \cdot 10^6$$

$$B_J = \frac{N_m}{Q_J} = \frac{N_m}{74} = 3{,}250 \qquad 6500 \qquad 8100 \qquad 9720$$

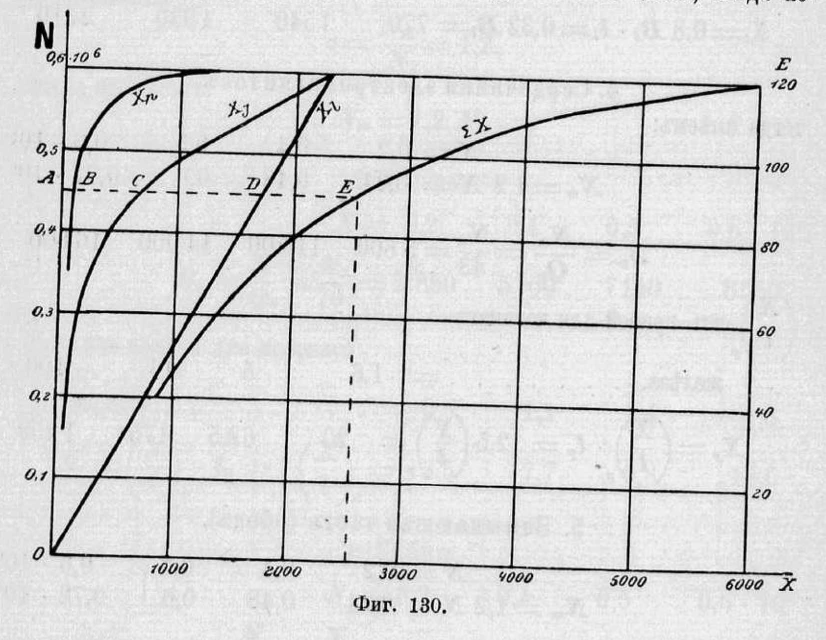
$\left(\frac{X}{l}\right)_z$ изъ кривой для чугуна $= 4{,}1 \qquad 19 \qquad 53 \qquad 167$

$$X_J = \left(\frac{X}{l}\right)_J \cdot l_J = 22\left(\frac{X}{l}\right)_J = 90 \qquad 418 \qquad 1160 \qquad 2350$$

6. Общая таблица.

$N =$	0,2	0,4	0,5	$0,6 \cdot 10^6$
$X_a =$	3,5	7,7	9,8	12,6
$X_z =$	3,2	9,2	16	36
$X_l =$	770	1540	1930	2310
$X_p =$	20	62,5	175	1250
$X_J =$	90	418	1160	2350
$\Sigma X = X_a + X_z + X_l + X_p + X_J =$	890	2040	3290	5960

Нанесемъ теперь число силовыхъ линій N по оси ординатъ; а соотвѣтствующіе ампервитки X_a, X_z, X_l и т. д. по оси абсциссъ, тогда по-



Фиг. 130.

лучимъ кривыя фиг. 130. Кривая X_l будетъ прямою. Такъ какъ величины X_a и X_z въ нашемъ случаѣ вообще почти не принимаются во вниманіе, то на фиг. 130 вычерчены только кривыя для X_l, X_p, X_J и ΣX. Изъ чертежа легко опредѣлить, сколько полнаго магнитнаго возбужденія ΣX расходуется на отдѣльныя части магнитной цѣпи. Такъ, напримѣръ, для магнитнаго потока OA необходимо затратить возбужденія AE. Изъ

послѣдняго на сердечники полюсовъ приходится AB, на ободъ AC и на междужелѣзное пространство AD. При этомъ соблюдено условіе, что

$$AB + AC + AD = AE.$$

Далѣе видимъ, что кривая ΣX въ началѣ совпадаетъ съ прямой X_l до тѣхъ поръ, пока съ увеличеніемъ насыщенія желѣза она не приметъ болѣе пологую форму.

Изъ магнитнаго потока N мы получимъ, затѣмъ, согласно уравненію (38) стр. 162 непосредственно электродвижущую силу:

$$E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8}.$$

Положимъ, что число оборотовъ n равно 1665, число проволокъ z на якорѣ 720; тогда при параллельной обмоткѣ якоря имѣемъ:

$$E = N \cdot \frac{1665}{60} \cdot 720 \cdot 10^{-8} = 200 \cdot N \cdot 10^{-6}.$$

Слѣдовательно, ординаты кривой ΣX даютъ непосредственно электродвижущую силу въ масштабѣ, указанномъ на правой сторонѣ фигуры. Впрочемъ необходимо указать, что значеніе ΣX относится къ одной парѣ полюсовъ, такъ какъ весь расчетъ былъ произведенъ только для одной магнитной цѣпи и буквою N обозначался магнитный потокъ только одного сѣвернаго полюса. Число ампервитковъ на всѣхъ парахъ полюсовъ будетъ, слѣдовательно, равно $p \cdot \Sigma X$.

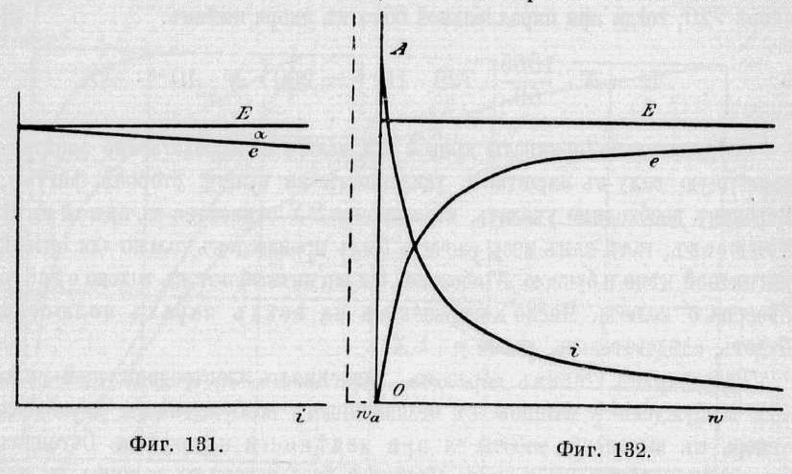
Разсмотрѣвъ, такимъ образомъ, зависимость электродвижущей силы отъ возбужденія у машины съ независимымъ возбужденіемъ, перейдемъ теперь къ выясненію работы ея при измѣненіи нагрузки. Оставимъ при этомъ возбужденіе и число оборотовъ безъ перемѣны, зажимы же машины соединимъ при помощи внѣшняго сопротивленія, напримѣръ, при помощи параллельно включенныхъ лампочекъ накаливанія. Чѣмъ больше мы включимъ такихъ параллельно соединенныхъ лампочекъ, тѣмъ больше будетъ токъ, отдаваемый машиною, т. е. тѣмъ больше будетъ ея нагрузка. При этомъ измѣнится, хотя и незначительно, напряженіе у зажимовъ машины. Въ то время какъ при холостомъ ходѣ напряженіе у зажимовъ было равно электродвижущей силѣ, при нагрузкѣ оно уменьшится на величину внутренней омической потери напряженія. Пусть w_a будетъ сопротивленіе якоря, тогда напряженіе у зажимовъ выразится уравненіемъ:

$$e = E - i \cdot w_a.$$

Если пренебречь дѣйствіемъ реакціи якоря, то электродвижущая сила, вслѣдствіе неизмѣннаго по величинѣ возбужденія, будетъ постоянною, т. е. представится на фиг. 131 прямою E. Омическая потеря напряженія пропорціональна силѣ тока, слѣдовательно, абсциссѣ. Поэтому проводимъ прямую e такъ, чтобы тангенсъ угла наклоненія ея α соотвѣтствовалъ уравненію:

$$tg\,\alpha = \frac{i \cdot w_a}{i} = w_a\,.$$

При построеніи угла α необходимо обратить вниманіе на различный масштабъ ординатъ и абсциссъ. Разности между величинами ординатъ кривыхъ E и e дадутъ всякій разъ омическую потерю напряженія для опредѣленной силы тока, а ординаты прямой e дадутъ напряженія у зажимовъ. На практикѣ же поступаютъ наоборотъ: отсчитывая величины напряженій у зажимовъ, прибавляютъ къ нимъ омическія потери напряженія въ якорѣ и, такимъ образомъ, опредѣляютъ постоянную электродвижущую силу.



Фиг. 131. Фиг. 132.

Можно также откладывать въ качествѣ абсциссъ внѣшнія сопротивленія w, т. е. частное отъ дѣленія e на i, а въ качествѣ ординатъ соотвѣтствующія послѣднимъ значенія e и i (фиг. 132). Такъ какъ произведеніе $i(w + w_a)$ равно постоянной электродвижущей силѣ, то кривую силы тока получаемъ въ видѣ равнобокой гиперболы. Ассимптотами послѣдней будутъ ось абсциссъ и прямая, параллельная оси ординатъ, отстоящая отъ послѣдней на разстояніи w_a. Кривая i пересѣчетъ ось ординатъ въ точкѣ A. Для этого состоянія работы внѣшнее сопротивленіе равно нулю, слѣдовательно, машина замкнута на короткое и $OA = \frac{E}{w_a}$ представитъ собою токъ при короткомъ замыканіи. Понятно, этотъ послѣдній находится далеко внѣ предѣловъ условій, возможныхъ для работы. Путемъ опыта этотъ токъ можно опредѣлить слѣдующимъ образомъ: въ самомъ началѣ возбужденія, слѣдовательно, когда еще электродвижущая сила мала, выбираютъ какой-либо моментъ и для этого произвольно выбраннаго состоянія работы снимаютъ кривую.

Очертаніе кривой e на фиг. 132 объясняется тѣмъ соображеніемъ, что съ одной стороны напряженіе у зажимовъ равно произведенію $i \cdot w$, а съ другой разности $E - i \cdot w$. При короткомъ замыканіи это напряженіе будетъ равно нулю, при чемъ оба зажима какъ бы представятъ одну точку и о разности ихъ потенціаловъ (уровней) не можетъ быть больше рѣчи. Вся электродвижущая сила будетъ здѣсь въ этотъ моментъ затрачена на проведеніе сильнаго тока короткаго замыканія черезъ внутреннее сопротивленіе.—Наоборотъ, напряженіе у зажимовъ достигаетъ своего наибольшаго значенія и становится равнымъ электродвижущей силѣ E, когда внѣшнее сопротивленіе безконечно велико, т. е. при холостомъ ходѣ.

Уже раньше, между прочимъ, указывалось на то, что видъ кривыхъ измѣняется размагничивающимъ дѣйствіемъ тока якоря. Къ этому присоединяется еще и то, что сопротивленіе якоря не является величиною постоянною, а возрастающею съ увеличеніемъ нагрѣва якоря, слѣдовательно, съ увеличеніемъ нагрузки. Учесть эти явленія путемъ простого расчета почти невозможно. Въ данномъ случаѣ и въ послѣдующихъ статьяхъ пренебрегается также и вліяніемъ остаточнаго магнетизма.

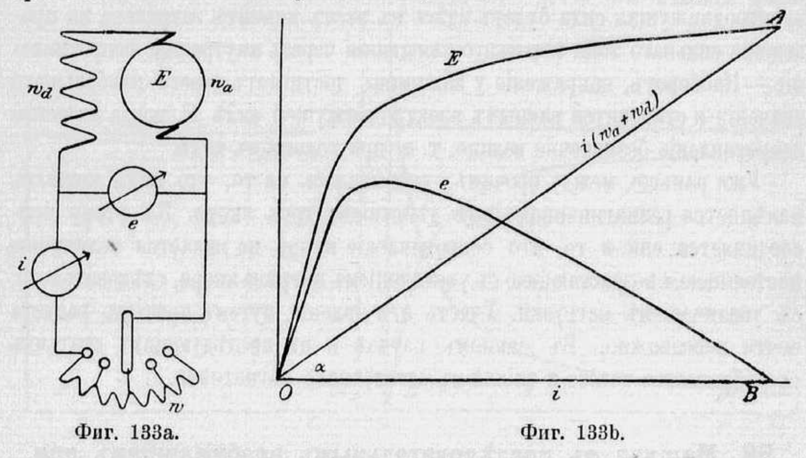
58. Машина съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ при измѣненіи нагрузки.

Явленія, сопровождающія работу машины съ независимымъ возбужденіемъ, являются особенно простыми потому, что электродвижущая сила при постоянномъ числѣ оборотовъ и постоянномъ возбужденіи не зависитъ отъ измѣненій во внѣшней цѣпи. Самовозбуждающіяся машины, т. е. собственно динамо, наоборотъ, представляютъ больше затрудненій для пониманія, такъ какъ у нихъ отъ внѣшней цѣпи зависитъ не только намагничивающій токъ, но и магнитный потокъ и электродвижущая сила.

Болѣе простыми эти соотношенія являются еще при машинѣ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, такъ какъ у нея одинъ и тотъ же токъ проходитъ черезъ якорь, обмотку электромагнитовъ и внѣшнюю

цѣпь. Послѣдовательное включеніе якоря, обмотки электромагнитовъ и пріемниковъ тока являлось по идеѣ наиболѣе простымъ и непосредственно вытекающимъ, и потому динамомашины до 1880 года строились въ видѣ машинъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ. Они тогда нашли себѣ примѣненіе въ качествѣ генераторовъ для питанія послѣдовательно включенныхъ дуговыхъ лампъ, въ то время какъ наиболѣе употребительное теперь параллельное включеніе пріемниковъ совершенно устраняетъ возможность примѣненія этихъ машинъ въ качествѣ генераторовъ съ послѣдовательной обмоткой. Наоборотъ, въ качествѣ электродвигателей, машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ сохранили за собою первенствующее значеніе.

Разсмотримъ, теперь, генераторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ при постоянномъ числѣ оборотовъ и перемѣнномъ внѣшнемъ сопротивленіи



Фиг. 133a. Фиг. 133b.

w (фиг. 133a). При этомъ станемъ наблюдать силу тока и напряженіе у зажимовъ и нанесемъ силу тока i по оси абсциссъ, а напряженіе у зажимовъ e по оси ординатъ (фиг. 133b). Затѣмъ проведемъ подъ угломъ α къ оси абсциссъ прямую, опредѣляемую слѣдующимъ уравненіемъ:

$$tg\,\alpha = w_a + w_d,$$

гдѣ w_d обозначаетъ сопротивленіе послѣдовательно включенной обмотки электромагнитовъ. Ординаты этой прямой представляютъ внутреннюю омическую потерю напряженія $i\,(w_a + w_d)$ машины. Если, теперь, прибавимъ эти ординаты прямой къ ординатамъ кривой напряженія у зажимовъ, то получимъ кривую E электродвижущей силы. Эта кривая является характеристикой машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ и представляетъ собою зависимость электродвижущей силы отъ намагничивающаго тока. Если вмѣсто силы тока i по оси абсциссъ стали бы откладывать произведеніе силы тока на число витковъ обмотки на электромагнитахъ, то получили бы разсмотрѣнную въ предыдущей статьѣ кривую намагничиванія машины (фиг. 127b).

Какъ видимъ, электродвижущая сила, при разомкнутой цѣпи, т. е. при холостомъ ходѣ, равна нулю, такъ какъ вслѣдъ за намагничивающимъ токомъ и магнитный потокъ становится равнымъ нулю. Однако если замкнуть зажимы посредствомъ небольшого сопротивленія, то машина самовозбуждается, и вслѣдствіе этого создается электродвижущая сила и токъ. Чѣмъ меньше мы выберемъ внѣшнее сопротивленіе, тѣмъ больше, согласно закону Ома, будетъ сила тока, тѣмъ больше будутъ также магнитный потокъ и электродвижущая сила, пока послѣдняя при короткомъ замыканіи не достигнетъ своего наибольшаго значенія. Напряженіе же у зажимовъ при короткомъ замыканіи будетъ равно нулю; вся электродвижущая сила AB пойдетъ на то, чтобы прогнать токъ OB черезъ внутреннее сопротивленіе. Точка A, такимъ образомъ, является точкою пересѣченія прямой съ кривой E.

Что касается напряженія у зажимовъ, то оно растетъ съ увеличеніемъ нагрузки, чтобы затѣмъ, по достиженіи своего наибольшаго значенія, снова пойти на убыль. Вслѣдствіе насыщенія желѣза должна наконецъ получиться такая точка, въ которой возрастаніе электродвижущей силы при усиленіи тока будетъ меньше увеличивающейся потери напряженія въ машинѣ.

Своеобразность работы самовозбуждающихся машинъ, въ силу которой электродвижущая сила зависитъ отъ полезнаго тока, выясняется еще болѣе, если обратимся къ внѣшнему сопротивленію. Тутъ всегда возникаетъ вопросъ, даетъ ли намъ при динамомашинахъ электродвижущая сила токъ согласно закону Ома или, наоборотъ, (намагничивающій) токъ создаетъ магнитный потокъ, а послѣдній возбуждаетъ электродвижущую силу. Оба положенія необходимо признать правильными, но тогда неизвѣстно, что же считать за причину, а что за слѣдствіе. На практикѣ дѣло обстоитъ такъ, что прежде всего будетъ измѣняться внѣшнее сопротивленіе,— значитъ причина,—а затѣмъ уже одновременно сила тока и электродвижущая сила. При большомъ числѣ послѣдовательно включенныхъ дуговыхъ лампъ внѣшнее сопротивленіе велико, и токъ, равно какъ и электродвижущая сила машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ незначительны. При маломъ числѣ послѣдовательно включенныхъ дуговыхъ лампъ внѣшнее сопротивленіе мало, тогда какъ сила тока и электродвижущая сила будутъ значительны.

59. Шунтовая машина (съ параллельнымъ возбужденіемъ) при измѣненіи нагрузки.

У шунтовой машины различаютъ внутреннюю и внѣшнюю характеристики. Внутреннюю или статическую характеристику опредѣляютъ, заставляя машину работать безъ нагрузки, при постоянномъ числѣ оборотовъ, и регулируя при этомъ при помощи реостата сопротивленіе возбуждающей обмотки. Нанося, затѣмъ, намагничивающій токъ i_m по оси абсциссъ и напряженія у зажимовъ по оси ординатъ, получаютъ кривую, которая представляетъ зависимость электродвижущей силы отъ намагничивающаго тока. Эта кривая имѣетъ точно такое же очертаніе, что и характеристика машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ или характеристика холостого хода машины съ независимымъ возбужденіемъ. Поэтому перейдемъ непосредственно къ разсмотрѣнію работы шунтовой машины при измѣненіи расхода тока во внѣшней цѣпи.

У машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ обмотка электромагнитовъ и внѣшняя сѣть включены послѣдовательно, и электродвижущая сила въ сильной степени зависитъ отъ потребленія тока. Обмотка электромагнитовъ шунтовой машины, наоборотъ, включена параллельно внѣшней сѣти, т. е. присоединена непосредственно къ щеткамъ машины (фиг. 134а). Поэтому измѣненіе потребленія тока во внѣшней сѣти уже болѣе не отзывается на магнитномъ потокѣ. Вліяніе расхода тока во внѣшней цѣпи на возбужденіе и на электродвижущую силу въ этомъ случаѣ относительно невелико, и мы имѣемъ здѣсь,—между предѣлами, возможными для практической работы—относительно постоянную электродвижущую силу. Явленія, сопровождающія работу шунтовой машины, поэтому, довольно просты, хотя полное уясненіе себѣ работы этой машины все же не будетъ столь легкимъ, какъ при машинѣ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

Увеличеніе потребленія тока во внѣшней сѣти прежде всего вызываетъ усиленіе тока въ якорѣ i_a, согласно уравненію:

$$i_a = i + i_m.$$

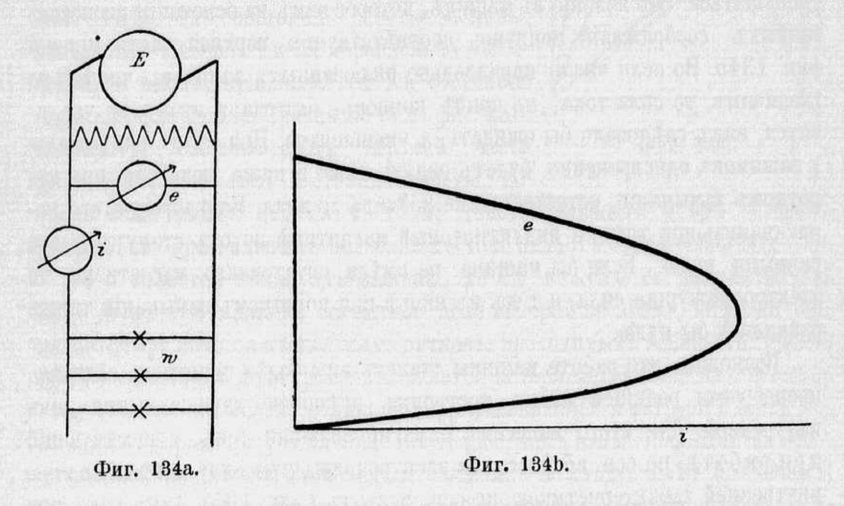
Вслѣдствіе этого увеличится также омическая потеря напряженія въ якорѣ и напряженіе у зажимовъ уменьшится согласно уравненію:

$$e = E - i_a w_a.$$

Слѣдовательно, напряженіе у зажимовъ имѣетъ свое наибольшее значеніе при холостомъ ходѣ, при возрастаніи же нагрузки падаетъ. Такъ

какъ обмотка электромагнитовъ примыкаетъ непосредственно къ зажимамъ, то при упавшемъ напряженіи ослабнетъ также и намагничивающій токъ. Вслѣдствіе этого уменьшится какъ магнитный потокъ, такъ и электродвижущая сила, благодаря чему напряженіе у зажимовъ еще разъ упадетъ. Слѣдовательно, измѣненіе напряженія при нагрузкѣ сравнительно съ напряженіемъ при холостомъ ходѣ, при прочихъ равныхъ условіяхъ, у шунтовой машины будетъ больше, чѣмъ у машины съ независимымъ возбужденіемъ, хотя по величинѣ оно само по себѣ и не достигнетъ тѣхъ большихъ размѣровъ, какихъ оно достигаетъ при машинахъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

Но и при шунтовой машинѣ можно, однако, достичь того, что паденіе напряженія при увеличеніи нагрузки будетъ настолько же малымъ, насколько



Фиг. 134a. Фиг. 134b.

оно бываетъ низкимъ при машинахъ съ независимымъ возбужденіемъ. Для этого машины устраиваютъ съ большимъ насыщеніемъ въ одной какой-либо части магнитной цѣпи. Тогда даже сравнительно сильное измѣненіе возбужденія почти не оказываетъ вліянія на магнитный потокъ и паденіе напряженія при нагрузкѣ равно въ этомъ случаѣ только омической потерѣ напряженія $i_a \cdot w_a$, подобно тому, какъ при машинѣ съ независимымъ возбужденіемъ. Подобнаго рода машины особенно пригодны для освѣтительныхъ станцій, отъ которыхъ для спокойнаго горѣнія лампъ требуется постоянное напряженіе у зажимовъ. Могущія еще появиться колебанія напряженія можно уравновѣсить при помощи реостата, включеннаго въ возбуждающую обмотку машины.

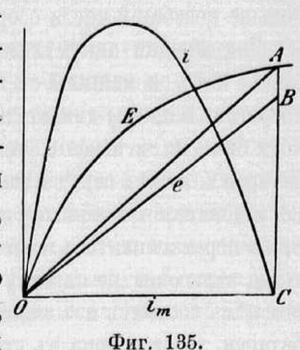
Наоборотъ, для зарядки аккумуляторовъ нужны машины съ незначительнымъ насыщеніемъ магнитной цѣпи. При началѣ зарядки, когда для преодолѣнія противоэлектродвижущей силы батареи необходимо только небольшое напряженіе у зажимовъ, въ цѣпь возбужденія включаютъ сопротивленіе, которое, по мѣрѣ зарядки аккумуляторовъ, все болѣе и болѣе выключается. Этимъ увеличиваютъ постепенно магнитный потокъ и электродвижущую силу машины и достигаютъ того, что сила тока, несмотря на возрастающую противодѣйствующую силу батареи, остается постоянною.

Если станемъ опредѣлять внѣшнюю характеристику машины опытнымъ путемъ и для этой цѣли будемъ измѣнять расходъ тока во внѣшней цѣпи путемъ параллельнаго включенія лампъ, то замѣтимъ, что напряженіе у зажимовъ сначала при увеличеніи расхода тока будетъ все больше и больше уменьшаться. Это явленіе въ машинѣ, которое намъ на основаніи вышесказанныхъ соображеній понятно, соотвѣтствуетъ верхней части кривой фиг. 134b. Но если число параллельно включенныхъ лампъ мы чрезмѣрно увеличимъ, то сила тока, въ концѣ концовъ, благодаря этому, не увеличится, какъ слѣдовало бы ожидать, а уменьшится. При этомъ напряженіе у зажимовъ одновременно будетъ падать ниже и ниже, пока оно, при короткомъ замыканіи, естественно не дойдетъ до нуля. Вслѣдствіе этого намагничивающій токъ и индуктируемый магнитный потокъ станутъ также равными нулю. Если бы машина не имѣла остаточнаго магнетизма, то электродвижущая сила и токъ въ якорѣ при короткомъ замыканіи также равнялись бы нулю.

Возможно, что работа машины станетъ еще болѣе понятною, если мы, пренебрегая реакціей якоря, построимъ внѣшнюю характеристику изъ внутренней. Для этого нанесемъ намагничивающій токъ, существующій при работѣ, по оси абсциссъ, а электродвижущую силу, опредѣляемую внутренней характеристикою, по оси ординатъ (фиг. 135). Такъ какъ при этомъ опытѣ мы измѣняемъ только внѣшній расходъ тока, сопротивленіе же цѣпи возбужденія оставляемъ безъ измѣненія, то напряженіе у зажимовъ будетъ пропорціонально намагничивающему току, согласно уравненію:

$$e = i_m \cdot w_m.$$

Слѣдовательно, кривую напряженія у зажимовъ мы получаемъ въ видѣ прямой e фиг. 135. Разности между ординатами кривыхъ E и e представятъ намъ потерю напряженія $i_a w_a = (i + i_m) w_a = i w_a + i_m \cdot w_a$. При холостомъ ходѣ намагничивающій токъ равенъ OC и омическая потеря напряженія въ якорѣ тогда составитъ $OC \cdot w_a = AB$. Отсюда слѣдуетъ, что разность ординатъ прямыхъ OA и OB представляетъ произведеніе $i_m \cdot w_a$. Разность ординатъ кривой E и прямой OA, представляющей произведеніе $i \cdot w_a$, даетъ намъ въ соотвѣтствующемъ масштабѣ токъ во внѣшней цѣпи. Нанесемъ величины силы тока въ измѣненномъ масштабѣ по оси ординатъ на фиг. 135, такимъ образомъ получимъ кривую i. Для нѣкотораго опредѣленнаго состоянія работы, какъ указываетъ фигура, сила тока достигнетъ своего наибольшаго значенія.



Фиг. 135.

Такъ какъ абсцисса i_m на фиг. 135 пропорціональна напряженію у зажимовъ, то кривая i при соотвѣтствующемъ масштабѣ совершенно тождественна или, вѣрнѣе, симметрична съ кривой e фиг. 134b. При этомъ лѣвая половина фиг. 135 соотвѣтствуетъ нижней части фиг. 134b, гдѣ состояніе работы машины, вслѣдствіе большого числа параллельно включенныхъ лампъ, приближается къ состоянію короткаго замыканія. Правая же часть фиг. 135, наоборотъ, соотвѣтствуетъ верхней части фиг. 134b, т. е. тому состоянію работы, которое обыкновенно имѣетъ мѣсто въ дѣйствительности и при которомъ напряженіе при сильныхъ колебаніяхъ тока падаетъ очень незначительно.

Что касается компаундъ-машины, то мы можемъ ее разсматривать какъ шунтовую машину, магнитное поле которой во время нагрузки усиливается при помощи нѣсколькихъ витковъ, проходимыхъ главнымъ токомъ. Этимъ усиленіемъ поля уравновѣшивается потеря напряженія на омическое сопротивленіе въ якорѣ, и машина при измѣняющейся нагрузкѣ даетъ постоянное напряженіе у зажимовъ. Послѣднее, какъ извѣстно, является необходимымъ при питаніи лампочекъ накаливанія по слѣдующимъ причинамъ:

1) потому, что сила тока въ каждой лампочкѣ пропорціональна приложенному напряженію, и энергія, затрачиваемая въ секунду, растетъ съ квадратомъ напряженія;

2) потому, что при нормальномъ напряженіи лампочка свѣтится желтоватымъ свѣтомъ, а при превышающемъ нормальное—интенсивно бѣлымъ. Слѣдовательно, незначительныя измѣненія напряженія вызываютъ несоразмѣрно большія колебанія свѣта, которыя особенно непріятны для глазъ.

Поэтому компаундъ-машины оказываются особенно пригодными для цѣлей освѣщенія. Если онѣ не получили еще особенно большого распространенія, то это, главнымъ образомъ, потому, что при мгновенномъ колебаніи нагрузки у нихъ происходитъ мгновенное колебаніе напряженія у за-

жимовъ. Это является слѣдствіемъ мгновеннаго измѣненія числа оборотовъ машины-двигателя, регуляторъ которой всегда обладаетъ нѣкоторою нечувствительностью. Эти мгновенныя колебанія чиселъ оборотовъ вызываютъ измѣненіе электродвижущей силы и напряженія у зажимовъ. Совмѣстно съ этимъ измѣняется также намагничивающій токъ шунтовой обмотки и магнитный потокъ. Потому, колебанія напряженія будутъ гораздо больше колебаній числа оборотовъ.

Для зарядки аккумуляторовъ компаундъ-машины пригодны такъ же мало, какъ и машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ. Если число оборотовъ машины-двигателя вслѣдствіе какихъ-либо причинъ уменьшится, хотя бы и на мгновеніе, то противодѣйствующая электродвижущая сила батареи возьметъ верхъ и погонитъ токъ въ обратномъ направленіи черезъ послѣдовательную обмотку электромагнитовъ. Послѣдніе могутъ вслѣдствіе этого перемагнититься и электродвижущія силы машины и батареи будутъ тогда включены не навстрѣчу другъ другу, а послѣдовательно. Такъ какъ вся цѣпь состоитъ изъ незначительнаго сопротивленія якоря, проводовъ и батареи, то сила тока въ этомъ случаѣ достигнетъ опасныхъ размѣровъ. Если же пожелаютъ заряжать батарею компаундъ-машиной, то необходимо выключать компаундную обмотку и работать, какъ шунтовой машиной.

При пользованіи же шунтовой машиной для зарядки батареи, наоборотъ, положительный полюсъ батареи всегда будетъ соединенъ съ положительнымъ полюсомъ машины, и черезъ обмотку электромагнитовъ токъ будетъ проходить постоянно въ одномъ и томъ же направленіи, если даже главный токъ и измѣнитъ почему-либо свое направленіе. Электродвижущія силы батареи и машины остаются постоянно включенными другъ другу навстрѣчу. При измѣненіи направленія главнаго тока на обратное машина становится электродвигателемъ и сила тока не можетъ чрезмѣрно возрасти. Измѣненіе направленія главнаго тока можетъ въ худшемъ случаѣ вызвать искреніе на коллекторѣ. Поэтому въ главную цѣпь включаютъ минимальный (автоматическій) выключатель, т. е. электромагнитъ, черезъ обмотку котораго проходитъ главный токъ. Когда противоэлектродвижущая сила батареи беретъ верхъ и главный токъ уменьшается, то якорь электромагнита отпадаетъ и выключаетъ тѣмъ самымъ батарею.

60. Параллельная работа батареи и машины.

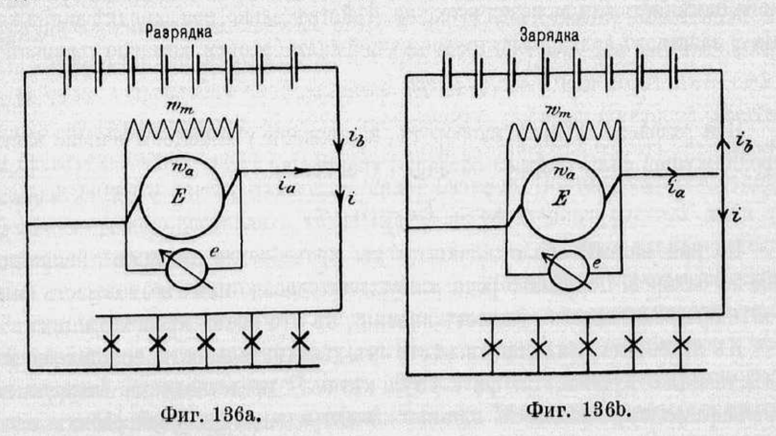
Требовавшееся въ предыдущей статьѣ постоянство напряженія въ сѣти почти идеально достигается параллельной работой машины и батареи. Сверхъ того батарея представляетъ собою весьма цѣнный резерв-

ный комплектъ, который даетъ возможность примѣнить машину съ расчетомъ лишь на средній расходъ мощности, а не на максимальный, и позволяетъ даже на время останавливать машину. Наконецъ, параллельно включенная батарея обусловливаетъ постоянство нагрузки динамо даже при сильно колеблющемся потребленіи тока (буфферная батарея у трамваевъ). Благодаря этому расходъ пара получается болѣе постояннымъ, что даетъ большую экономію въ топливѣ.

Вышеуказанныя преимущества батареи покоятся на двухъ слѣдующихъ самыхъ существенныхъ свойствахъ аккумулятора: на постоянствѣ электродвижущей силы и на незначительномъ сопротивленіи. Отсюда вытекаетъ, что напряженіе у зажимовъ практически равно электродвижущей силѣ батареи, слѣдовательно, оно постоянно, такъ какъ омической потерей напряженія въ батареѣ можно пренебречь. Машина при этомъ работаетъ какъ бы съ независимымъ возбужденіемъ, такъ какъ обмотка электромагнитовъ присоединена къ постоянному напряженію батареи. Разсмотримъ теперь измѣненіе расхода тока, возбужденія, напряженія батареи и числа оборотовъ.

1. Измѣненіе расхода тока.

Такъ какъ электродвижущая сила батареи во время зарядки и разрядки измѣняется очень медленно, то мы можемъ напряженіе батареи за



Фиг. 136a. Фиг. 136b.

разсматриваемый промежутокъ времени считать постояннымъ. Пусть E электродвижущая сила машины, включенной параллельно батареѣ, возбу-

жденіе и число оборотовъ которой остается безъ измѣненія; тогда токъ въ якорѣ будетъ постояннымъ, согласно уравненію

$$i_a = \frac{E - e}{w_a}.$$

Независимо, слѣдовательно, отъ измѣненія потребленія тока во внѣшней цѣпи напряженіе у зажимовъ и токъ въ якорѣ будутъ постоянны. Если, напримѣръ, батарея будетъ разряжаться (фиг. 136a) и во внѣшней цѣпи будутъ включены параллельно соединенныя лампочки накаливанія, то увеличеніе потребленія тока будетъ покрыто почти исключительно одной только батареей. Если, наоборотъ, батарея будетъ заряжаться (фиг. 136b) и въ сѣти будетъ включено болѣе значительное число лампъ то сѣть какъ бы отниметъ отъ батареи часть заряднаго тока. Здѣсь мы имѣемъ случай, когда источникъ доставляетъ одинъ и тотъ же токъ, который мы можемъ внѣ его произвольно распредѣлить между батареей и сѣтью.

При измѣненіи расхода тока во внѣшней цѣпи батарея можетъ даже перейти изъ состоянія зарядки въ состояніе разрядки. Если, напримѣръ, токъ во внѣшней цѣпи слабѣе тока якоря, то излишекъ тока пойдетъ въ батарею въ видѣ заряднаго тока. Если же, наоборотъ, расходъ тока во внѣшней цѣпи будетъ больше тока въ якорѣ, то изъ батареи пойдетъ разрядный токъ. Когда же машина доставляетъ токъ какъ разъ средней силы, то батарея постоянно переходитъ отъ состоянія зарядки къ разрядкѣ и наоборотъ. Это оказывается возможнымъ только потому, что напряженіе у зажимовъ измѣняется лишь незначительно. Дѣйствительно, при зарядкѣ напряженіе у зажимовъ больше электродвижущей силы батареи согласно уравненію:

$$e = E_b + i_b \cdot w_b \, .$$

При разрядкѣ батареи, наоборотъ, напряженіе у зажимовъ меньше электродвижущей силы батареи согласно уравненію:

$$e = E_b - i_b \cdot w_b \, .$$

Но при нашихъ разсужденіяхъ мы пренебрегли паденіемъ напряженія въ батареѣ. Подобнаго рода разсужденіе давало намъ возможность наиболѣе просто выяснить сущность явленій, въ это время происходящихъ.

Къ явленіямъ, имѣющимъ мѣсто въ дѣйствительности, мы подойдемъ слѣдующимъ путемъ. На фиг. 137a вѣтвь B представляетъ батарею во время разрядки, а вѣтвь M машину. Электродвижущая сила обоихъ вѣтвей приблизительно одинакова. При возрастаніи тока въ сѣти главная часть добавочнаго тока пойдетъ тогда черезъ ту вѣтвь, у которой меньшее сопротивленіе, т. е. черезъ батарею, въ то время, какъ черезъ машину

пойдетъ только незначительная часть тока. Этого какъ разъ мы и желаемъ достичь при параллельномъ включеніи батареи и машины. Буфферное дѣйствіе батареи будетъ тѣмъ лучше, чѣмъ больше будетъ сопротивленіе машины и чѣмъ меньше сопротивленіе батареи.

Теоретически полное буфферное дѣйствіе предполагаетъ безконечно малое сопротивленіе батареи. На практикѣ буфферное дѣйствіе болѣе или менѣе несовершенно, такъ какъ измѣненія нагрузки, какъ мы видѣли выше, падаютъ отчасти и на машину. Поэтому иногда для того, чтобы привести батарею къ большей «чувствительности», необходимо, согласно Пирани

Фиг. 137a.

Фиг. 137b.

(фиг. 137b), въ цѣпь батареи включить вольтодобавочную машину. Послѣдняя одновременно, но противоположно возбуждается шунтовой обмоткой, приключенной параллельно къ сѣти, и послѣдовательной, включенной въ сѣть и проходимой токомъ сѣти. При средней нагрузкѣ сѣти электродвижущая сила вольтодобавочной машины равна нулю. При большой силѣ тока послѣдовательная обмотка превышаетъ дѣйствіе шунтовой обмотки и электродвижущая сила вольтодобавочной машины дѣйствуетъ въ одномъ направленіи съ электродвижущей силой батареи. Поэтому батарея будетъ болѣе энергично доставлять токъ. При незначительномъ расходѣ тока во внѣшней сѣти шунтовая обмотка переодолѣваетъ дѣйствіе послѣдовательной обмотки и вольтодобавочная машина дѣйствуетъ противъ батареи. Вслѣдствіе незначительности результирующей электродвижущей силы вѣтви батареи, эта послѣдняя будетъ сильно заряжаться. Мы можемъ разсматривать это явленіе еще такимъ образомъ, что электродвижущая сила вольтодобавочной машины прибавляется къ напряженію сѣти, такъ что противодѣйствіе батареи будетъ сильно преодолѣваться. Поэтому токъ главной динамомашины и при сильныхъ измѣненіяхъ расхода тока во внѣшней цѣпи остается безъ измѣненія.

2. Измѣненіе возбужденія.

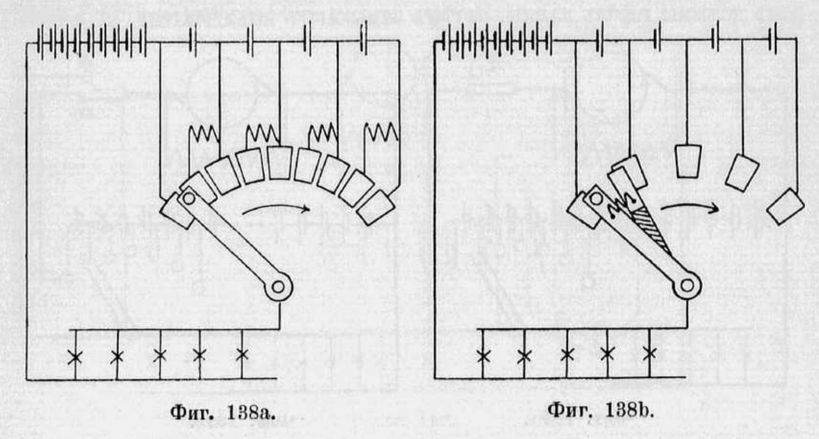
Если, напримѣръ, желаютъ зарядить батарею, то, измѣняя возбужденіе, доводятъ напряженіе машины до размѣровъ, при которыхъ оно превышаетъ напряженіе батареи только на нѣсколько вольтъ. Послѣ этого включаютъ батарею, при чемъ положительный полюсъ машины соединяется съ положительнымъ полюсомъ батареи. Такъ какъ обѣ противодѣйствующія электродвижущія силы почти уравновѣшиваютъ другъ друга, то сила тока пока еще почти равна нулю. Послѣ включенія доводятъ затѣмъ токъ въ якорѣ, путемъ усиленія возбужденія, до желаемой величины (ср. вышеуказанное уравненіе для i_a на стр. 236). Показанія вольтметра при этомъ почти совершенно не измѣняются, такъ какъ напряженія машины и батареи теперь одинаковы.

Наоборотъ, ослабленіе тока въ якорѣ путемъ уменьшенія возбужденія до величины, равной расходу тока во внѣшней сѣти, прерываетъ зарядку. Токъ въ батареѣ при этомъ становится равнымъ нулю, и батарея остается, въ качествѣ регулятора напряженія, присоединенной къ зажимамъ сѣти и машины.

При большемъ расходѣ тока во внѣшней цѣпи регулировочное сопротивленіе шунта служитъ для соотвѣтственнаго распредѣленія нагрузки на машину и батарею. Возбужденіе тогда измѣняютъ такимъ образомъ, чтобы машина постоянно работала на полную нагрузку, а батарея доставляла избытокъ расхода.

3. Измѣненіе напряженія въ батареѣ.

До сихъ поръ мы предполагали, что напряженіе батареи постоянно, и это было вѣрно лишь постольку, поскольку сила тока оказываетъ небольшое вліяніе на напряженіе. Но напряженіе батареи, соотвѣтственно кривымъ зарядки и разрядки, все же подвержено постепенному, въ зависимости отъ времени, измѣненію, которое необходимо уравновѣсить элементнымъ коммутаторомъ. Для того, чтобы включеніе или выключеніе какого-либо элемента происходило автоматически безъ перерыва тока, у элементнаго коммутатора, представленнаго на фиг. 138а, между главными контактами устроены еще промежуточные, и каждые два рядомъ расположенные сегмента соединены другъ съ другомъ промежуточнымъ сопротивленіемъ. Рычагъ при этомъ настолько широкъ, что перекрываетъ изоляцію между главнымъ контактомъ и сосѣднимъ промежуточнымъ. Въ начерченномъ положеніи рычага всѣ лампы включены всецѣло въ лѣвую часть батареи и первый добавочный элементъ батареи черезъ рычагъ и промежуточное сопротивленіе замкнутъ на себя. При дальнѣйшемъ перемѣщеніи вправо рычагъ всецѣло перейдетъ на промежуточный контактъ. Поэтому первый добавочный элементъ батареи будетъ уже включенъ въ сѣть, и электродвижущая сила, слѣдовательно, увеличится на 2 вольта, но токъ сѣти долженъ при этомъ пройти черезъ промежуточное сопротивленіе. При подходящемъ выборѣ промежуточнаго сопротивленія можно достичь того, что потеря напряженія на это сопротивленіе при нормальномъ токѣ будетъ равна какъ разъ 1 вольту; тогда напряженіе въ сѣти увеличится только на $2 - 1 = 1$ вольтъ. При дальнѣйшемъ перемѣщеніи вправо рычагъ перейдетъ на главный контактъ и первый добавочный элементъ будетъ включенъ уже непосредственно въ цѣпь. Напряженіе при этомъ опять повысится на 1 вольтъ и все повышеніе, слѣдовательно, составитъ 2 вольта.



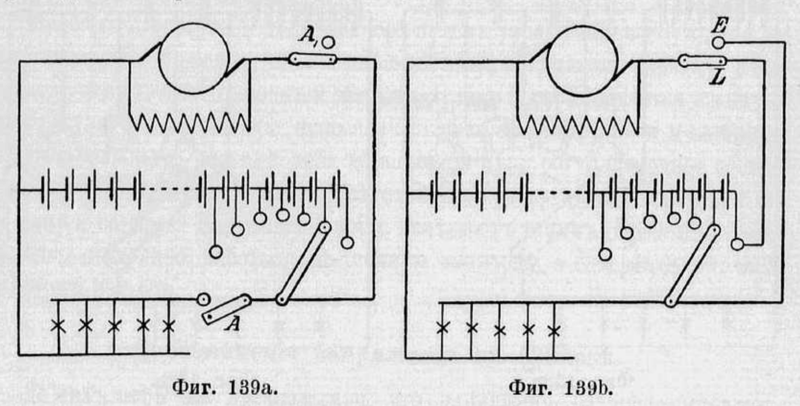
Фиг. 138a. Фиг. 138b.

Но можно употреблять и два изолированныхъ другъ отъ друга и неподвижно скрѣпленныхъ рычага, соединенныхъ между собою при помощи промежуточнаго сопротивленія (фиг. 138b). Въ начерченномъ положеніи первый добавочный элементъ, при помощи обоихъ рычаговъ и промежуточнаго сопротивленія, замкнутъ на самого себя. При дальнѣйшемъ перемѣщеніи вправо главный рычагъ сходитъ съ лѣваго металлическаго контакта и сѣть черезъ добавочное сопротивленіе присоединяется къ батареѣ, увеличившейся на одинъ добавочный элементъ. При дальнѣйшемъ перемѣщеніи вправо оба рычага соприкасаются одновременно со вторымъ, считая слѣва, контактомъ; наконецъ, вспомогательный рычагъ сойдетъ съ этого контакта, и сѣть приключится къ батареѣ съ напряженіемъ, увеличившимся на 2 вольта.

Примѣненіе такого простого элементнаго коммутатора пригодно повсюду, гдѣ во время зарядки не горитъ ни одной лампы (фиг. 139). Ры-

чагъ въ этомъ случаѣ,—напримѣръ, во время утреннихъ часовъ,—служитъ въ качествѣ заряднаго рычага и выключаетъ при этомъ постепенно остальные вправо расположенные добавочные элементы. Эти послѣдніе включаются для работы только въ концѣ ночного времени и поэтому при зарядкѣ заряжаются раньше главной части батареи. Во время зарядки рычагъ перемѣщается до лѣваго контакта. Такъ какъ напряженіе батареи во время зарядки больше напряженія въ сѣти, на которое расчитаны лампы сѣти, то выключатель A долженъ во время зарядки быть разомкнутымъ. Послѣ окончанія зарядки выключается и выключатель A_1.

Вечеромъ, когда лампы должны горѣть, устанавливаютъ рычагъ, являющійся теперь разряднымъ рычагомъ, на такомъ контактѣ, что напряженіе батареи до рычага равно нормальному напряженію въ сѣти, при которомъ должны горѣть лампы. Затѣмъ замыкаютъ выключатель A и вклю-

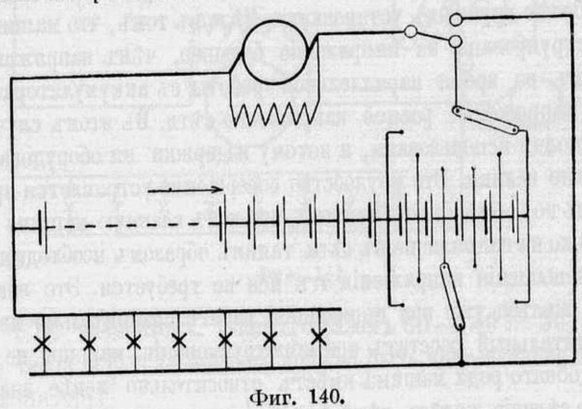


Фиг. 139a. Фиг. 139b.

чаютъ машину вышеописаннымъ путемъ въ сѣть, т. е. одновременно же и на батарею. Послѣ этого регулируютъ магнитное возбужденіе такъ, чтобы машина постоянно была полностью нагружена, а батарея включалась только въ часы наивысшаго потребленія тока, напримѣръ во время ночной работы. Затѣмъ рычагъ коммутатора, соотвѣтственно постепенно падающему напряженію батареи, перемѣщаютъ постепенно вправо настолько, чтобы все время у лампъ поддерживалось постоянное напряженіе.

Число добавочныхъ элементовъ опредѣляется при этомъ устройствѣ изъ того расчета, что напряженіе каждаго элемента въ началѣ разрядки составляетъ около 2 вольтъ, а въ концѣ около 1,8 вольта. Для напряженія въ лампахъ въ 110 вольтъ въ началѣ разрядки необходимо $110 : 2 = 55$ элементовъ, а въ концѣ $110 : 1{,}8 = 60$ элементовъ. Слѣдовательно около 10% всѣхъ элементовъ необходимо присоединить къ коммутатору.

Поставленное нами выше условіе, что во время зарядки не должно происходить никакого потребленія тока во внѣшней сѣти, можетъ имѣть мѣсто только въ немногихъ случаяхъ. Если желательно во время зарядки горѣніе лампъ, то необходимо устраивать двойной элементный коммутаторъ (фиг. 140). Въ этомъ случаѣ сѣть постоянно присоединена къ разрядному рычагу, который теперь, во время зарядки и разрядки, служитъ только регуляторомъ напряженія. Зарядный рычагъ постоянно находится, на фиг. 140, справа отъ разряднаго рычага, вообще постоянно съ внѣшней стороны разряднаго рычага. Онъ выключаетъ во время зарядки заряженные вполнѣ элементы, такимъ образомъ послѣдніе больше не портятся отъ продолжительной перегрузки. Однако и въ этомъ случаѣ черезъ добавочные элементы между обоими рычагами будетъ проходить сумма токовъ батареи и сѣти.


Фиг. 140.

Въ концѣ зарядки оба рычага будутъ находиться на одномъ и томъ же крайнемъ лѣвомъ контактѣ, при чемъ напряженія машины, батареи и сѣти будутъ равнозначущи. Тогда токъ, идущій черезъ батарею, путемъ регулированія въ шунтѣ доводятъ до нуля и перемѣщаютъ рычагъ переключателя такъ, что машина непосредственно присоединяется къ сѣти, т. е. къ разрядному рычагу. Машина снова временно одна питаетъ сѣть, и батарея служитъ только регуляторомъ напряженія, пока она при возрастающемъ внѣшнемъ потребленіи тока автоматически не будетъ привлечена къ доставленію тока. Напряженіе ея при этомъ постепенно будетъ убывать, разрядный рычагъ будетъ перемѣщаться вправо и при помощи упора захватитъ съ собою зарядный рычагъ. Съ принципіальной точки зрѣнія вышеупомянутое перемѣщеніе рычага переключателя не явля-

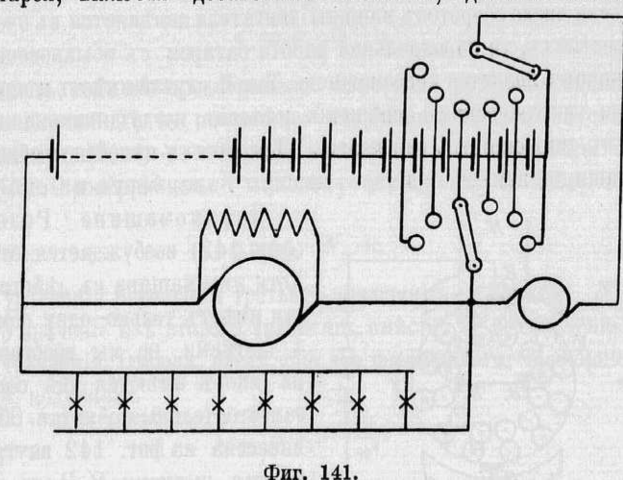
лось бы необходимымъ, такъ какъ оба рычага элементнаго коммутатора при разрядкѣ всегда стоятъ на одномъ и томъ же контактѣ. Но на практикѣ оно необходимо для того, чтобы во время вечернихъ часовъ скользящія пружины разряднаго рычага не нагружались суммою токовъ батареи и машины.

Какъ видимъ, соотвѣтствующіе контакты заряднаго и разряднаго рычаговъ соединены между собою, т. е. на практикѣ обходятся съ однимъ рядомъ контактовъ, по которому скользятъ оба рычага. Только ради ясности на фиг. 140 вычерчены два ряда контактовъ.

При употребленіи двойного элементнаго коммутатора уже является возможнымъ горѣніе лампъ во время зарядки, поддержка постояннаго напряженія сѣти и выключеніе вполнѣ заряженныхъ элементовъ. Между тѣмъ имѣется все же одинъ недостатокъ, который особенно ощутителенъ при болѣе крупныхъ установкахъ. Дѣло въ томъ, что машина должна быть конструирована на напряженіе большее, чѣмъ напряженіе сѣти, а между тѣмъ во время параллельной работы съ аккумуляторами должна развивать напряженіе, равное напряженію сѣти. Въ этомъ случаѣ она не бываетъ вполнѣ использована, и потому издержки на оборудованіе непроизводительно велики. Это неудобство совершенно устраняется при употребленіи вольтодобавочной машины, при чемъ главную машину конструируютъ только на напряженіе въ сѣти, такимъ образомъ необходимаго значительнаго повышенія напряженія отъ нея не требуется. Это значитъ, что магнитное желѣзо уже при нормальной работѣ сравнительно насыщено, и болѣе значительный реостатъ при конструированіи машины не предполагался. Подобнаго рода машина имѣетъ относительно менѣе значительное поперечное сѣченіе желѣза, чѣмъ машины, предназначенныя для зарядки аккумуляторовъ, и потому обходится дешевле.

При примѣненіи вольтодобавочной машины (фиг. 141) главная машина все время присоединена къ разрядному рычагу, слѣдовательно, къ сѣти, въ то время какъ добавочные элементы, расположенные между заряднымъ и разряднымъ рычагами, заряжаются вольтодобавочной машиной. При предположеніи, что посредствомъ регулированія вольтодобавочной машины зарядный токъ добавочныхъ элементовъ будетъ сдѣланъ равнымъ зарядному току главной части батареи, изъ главной части батареи непосредственно черезъ добавочные элементы и вольтодобавочную машину пойдетъ токъ одинаковой силы. Разрядный рычагъ, слѣдовательно, будетъ безъ тока, такъ какъ онъ, подобно вѣтви мостика Уитстона, соединяетъ двѣ точки равнаго потенціала. Онъ служитъ въ этомъ случаѣ исключительно въ качествѣ регулятора напряженія.

Что касается числа добавочныхъ элементовъ при примѣненіи двойного элементнаго коммутатора, то въ концѣ зарядки у насъ имѣется напряженіе въ каждомъ элементѣ въ 2,7 вольта; главная часть батареи, слѣдовательно, при 110 вольтъ напряженія въ сѣти должна состоять изъ $110:2,7=40$ элементовъ. Съ другой стороны въ концѣ разрядки мы имѣемъ въ каждомъ элементѣ напряженіе въ 1,8 вольта. Слѣдовательно, вся батарея, включая добавочные элементы, должна состоять изъ



Фиг. 141.

$110:1,8=60$ элементовъ. Такимъ образомъ $60-40=20$ элементовъ или 30% числа всѣхъ элементовъ должно быть присоединено къ элементному коммутатору.

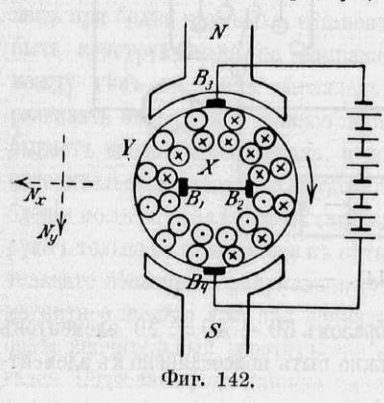
3. Колебаніе числа оборотовъ машины-двигателя.

До сихъ поръ всѣ наши расчеты мы производили, принимая электродвижущую силу машины постоянною, теперь же разсмотримъ, каково будетъ вліяніе колебанія числа оборотовъ машины-двигателя на напряженіе у зажимовъ и на токъ въ якорѣ, предполагая при этомъ расходъ тока во внѣшней цѣпи неизмѣннымъ. Если машина работаетъ безъ батареи, то колебаніе числа оборотовъ вызываетъ значительное измѣненіе напряженія. Но въ данномъ случаѣ напряженіе цѣпи является въ то же время напряженіемъ батареи, слѣдовательно, можетъ считаться практически постояннымъ. Токъ въ якорѣ при измѣненіи числа оборотовъ, отсюда и электродвижущая сила E машины будетъ измѣняться, согласно уравненію

$$i_a=\frac{E-e}{w_a}.$$

Если, напримѣръ, число оборотовъ въ какой-нибудь моментъ уменьшится, то понизятся также электродвижущая сила E и сила тока въ якорѣ. Такъ какъ расходъ тока i во внѣшней сѣти остался безъ измѣненія, то при разрядкѣ батарея доставляетъ тѣмъ больше тока, чѣмъ меньше его даетъ якорь. При зарядкѣ, наоборотъ, съ ослабленіемъ тока въ якорѣ въ батарею идетъ соотвѣтственно меньше тока. Колебанія числа оборотовъ машины-двигателя переходятъ, такимъ образомъ, въ колебаніе тока батареи.

Но, если число оборотовъ машины-двигателя измѣняется въ очень большихъ предѣлахъ, то параллельная работа батареи съ обыкновенными динамомашинами является невозможною. Такой случай имѣетъ мѣсто, напримѣръ, при электрическомъ освѣщеніи поѣздовъ, когда динамомашины приводятся въ движеніе отъ оси колесъ. Для такихъ цѣлей потребны особыя динамомашины, какъ, напримѣръ, машины Розенберга и Основа.



Фиг. 142.

Динамомашина Розенберга (фиг. 142) возбуждается отъ якоря. Хотя эта машина въ дѣйствительности имѣетъ только одну обмотку съ 4 щетками, но мы вообразимъ, что на якорѣ имѣются двѣ совершенно самостоятельныя обмотки. Обмотка X нанесена на фиг. 142 внутри и замкнута щетками $B_1 B_2$ на короткое. Токъ i_x этой обмотки, создающій горизонтальный возбуждающій потокъ N_x, является, слѣдовательно, возбуждающимъ токомъ.

Этотъ возбуждающій токъ создается тѣмъ, что обмотка X пересѣкаетъ вспомогательный вертикальный силовой потокъ N_y. Этотъ потокъ создается изъ взаимодѣйствія тока i_1 электромагнитовъ и полезнаго тока i_y, который проходитъ по обмоткѣ Y якоря и воспринимается щетками $B_3 B_4$.

Такъ какъ обмотка электромагнитовъ приключена къ напряженію батареи, то токъ i_1 постояненъ. Теперь можно видѣть, что ампервитки полезнаго тока i_y, даже въ томъ случаѣ, когда число оборотовъ возрастаетъ чрезмѣрно, должны быть меньше, чѣмъ постоянные ампервитки i_1. Это основано на томъ, что при равенствѣ обоихъ ампервитковъ силовой потокъ N_y исчезъ бы, и тогда индуктируемый возбуждающій токъ i_x былъ бы равенъ нулю.

Яснѣе самый процессъ станетъ путемъ расчета. Возбуждающій потокъ N_x, создаваемый токомъ i_x, пропорціоналенъ этому току i_x:

$$N_x = c_1 \cdot i_x.$$

Силовой потокъ N_y пропорціоналенъ разности ампервитковъ токовъ i_1 и i_y:

$$N_y = c_2 i_1 - c_3 i_y.$$

Согласно закону Ома, токъ i_x пропорціоналенъ электродвижущей силѣ въ короткозамкнутой цѣпи. Эта послѣдняя, согласно уравн. (38) стр. 162, пропорціональна силовому потоку N_y и числу оборотовъ n, т. е.

$$i_x = c_4 \cdot N_y \cdot n.$$

Наконецъ, если мы пренебрежемъ омической потерей напряженія въ полезной обмоткѣ Y, то постоянное напряженіе батареи e будетъ равно электродвижущей силѣ въ полезной обмоткѣ Y, слѣдовательно, согласно уравн. (38) пропорціонально силовому потоку N_x и числу оборотовъ n, т. е.

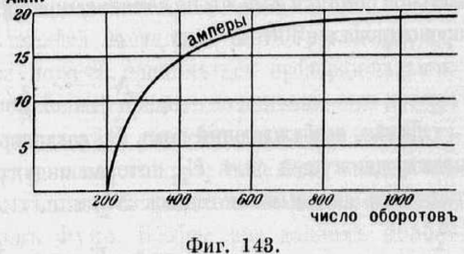
$$e = c_5 \cdot N_x \cdot n.$$

Изъ уравненія перваго и третьяго исключимъ i_x, вмѣсто N_y подставимъ его значеніе изъ второго уравненія, вмѣсто N_x его значеніе изъ четвертаго уравненія. Отсюда, введя еще два коэффиціента пропорціональности a и b, получаемъ

$$i_y = a \cdot i_1 - \frac{b}{n^2}.$$

Какъ видимъ, для очень большого числа оборотовъ второй членъ правой части будетъ безконечно малъ, т. е., иначе говоря, токъ машины почти не зависитъ отъ числа оборотовъ. На фиг. 143 сила тока нанесена въ видѣ функцій числа оборотовъ и для произвольно выбранныхъ значеній

$$a \cdot i_1 = 20 \quad \text{и} \quad b = 80 \cdot 10^4.$$



Фиг. 143.

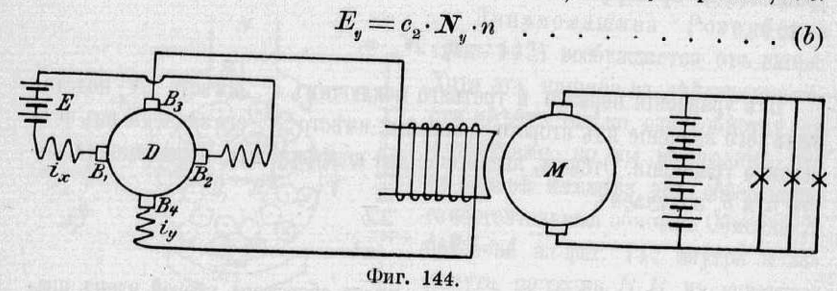
Для того, чтобы при очень небольшомъ числѣ оборотовъ не появлялся обратный токъ, между машиной и батареей помѣщаютъ алюминіевый элементъ, состоящій изъ алюминіеваго и желѣзнаго электродовъ, опущенныхъ въ какой-нибудь нейтральный растворъ. Подобнаго рода элементы обладаютъ свойствомъ пропускать токъ только въ направленіи отъ желѣза къ алюминію. Необходимо обратить вниманіе на то, что у машины Розенберга измѣненіе направленія вращенія не измѣняетъ знака у главныхъ щетокъ $B_3 B_4$.

Подобнаго же рода результатъ достигаетъ Оснось путемъ устройства, представленнаго на фиг. 144. У главной машины M для возбужденія ея полюсовъ имѣется возбудитель D, заклиненный съ ней на одномъ валу. На якорѣ этого возбудителя мы можемъ вообразить горизонтальную и вертикальную обмотки. Токъ i_x, который проходитъ (фиг. 144) электромагниты возбудителя, создается разностью электродвижущихъ силъ E вспомогательной батареи и E_y, силы, индуктируемой въ обмоткѣ X между щетками B_1 и B_2 вертикальнымъ силовымъ потокомъ N_y. Такимъ образомъ, мы имѣемъ

$$i_x = c_1(E - E_y) \quad \ldots \ldots \ldots \quad (a)$$

Электродвижущая сила E_y, индуктируемая въ обмоткѣ X силовымъ потокомъ N_y, пропорціональна силовому потоку N_y и числу оборотовъ, т. е.

$$E_y = c_2 \cdot N_y \cdot n \quad \ldots \ldots \ldots \quad (b)$$



Фиг. 144.

Силовой потокъ N_y, создаваемый токомъ i_y, проходящимъ по вертикальной обмоткѣ якоря и по компенсаціонной обмоткѣ, изображенной внизу, пропорціоналенъ этому току, т. е.

$$N_y = c_3 \cdot i_y \quad \ldots \ldots \ldots \quad (c)$$

Далѣе, возбуждающій токъ i_y, согласно закону Ома, пропорціоналенъ электродвижущей силѣ E_x, которая индуктируется въ обмоткѣ Y горизонтальнымъ силовымъ потокомъ N_x, т. е.

$$i_y = c_4 \cdot E_x = c_5 \cdot N_x \cdot n \quad \ldots \ldots \ldots \quad (d)$$

Наконецъ, силовой потокъ N_x пропорціоналенъ току i_x, которымъ онъ создается, т. е.

$$N_x = c_6 \cdot i_x \quad \ldots \ldots \ldots \quad (e)$$

Теперь подставимъ значеніе N_x изъ уравненія (e) въ уравненіе (d), затѣмъ для i_x подставимъ его значеніе изъ уравненія (a) и вмѣсто E_y при помощи уравненія (b) и (c) величину i_y, тогда получаемъ, если a и b постоянныя величины:

$$i_y = \frac{n}{a + b \cdot n^2}.$$

Для очень большого числа оборотовъ a можно пренебречь, какъ незначительной величиной по сравненію съ $b \cdot n^2$ и возбуждающій токъ i_y будетъ обратно пропорціоналенъ числу оборотовъ. При незначительномъ насыщеніи главной динамомашины ея силовой потокъ будетъ обратно пропорціоналенъ числу оборотовъ. Отсюда слѣдуетъ, что измѣненіе числа оборотовъ не вліяетъ на электродвижующую силу главной динамомашины, потому она можетъ включаться параллельно батареѣ.

61. Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія динамомашинъ.

Потери динамомашинъ состоятъ изъ потерь при холостомъ ходѣ и изъ потерь на тепло Джоуля. Потеря при холостомъ ходѣ машины P_0 обусловливается механическимъ треніемъ въ подшипникахъ и у щетокъ. Къ этой потерѣ присоединяется потеря отъ тренія о воздухъ, въ особенности въ машинахъ, въ желѣзѣ якоря которыхъ устроены проходы для значительной вентиляціи. Потеря на треніе, понятно, не зависитъ отъ возбужденія. Къ этимъ потерямъ присоединяется еще потеря на гистерезисъ въ желѣзѣ якоря. Послѣдняя при незначительной индукціи пропорціональна индукціи въ 1,6 степени, а при употребляемой теперь индукціи въ 10 000 силовыхъ линій на кв. см. въ желѣзѣ якоря и въ 20 000 силовыхъ линій на кв. см. въ зубцахъ якоря можетъ приниматься пропорціональною квадрату индукціи. Наконецъ, необходимо принять во вниманіе еще потерю на токи Фуко въ желѣзѣ якоря, желѣзѣ полюсовъ, въ мѣди и болтахъ якоря. Послѣдняя потеря пропорціональна квадрату индукціи, такъ какъ съ увеличеніемъ густоты силовыхъ линій возрастаетъ не только электродвижущая сила, но и сила токовъ Фуко. Вообще при данномъ возбужденіи и числѣ оборотовъ потери при холостомъ ходѣ можно считать за величину постоянную.

Къ вышеупомянутымъ потерямъ при холостомъ ходѣ присоединяются еще во время работы машины потери на тепло Джоуля въ обмоткѣ якоря $i_a^2 \cdot w_a$ и въ шунтовой обмоткѣ $e \cdot i_m$.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія въ общемъ видѣ опредѣляется, какъ отношеніе полезной мощности $e \cdot i$ ко всей сообщаемой мощности. Послѣд-

няя идетъ на образованіе полной электрической мощности $E \cdot i_a$ и на покрытіе мощности, потребной для холостого хода.

Слѣдовательно, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія будетъ:

$$\eta = \frac{e \cdot i}{E \cdot i_a + P_0} = \frac{e \cdot i}{e \cdot i + i_a^2 \cdot w_a + e \cdot i_m + P_0} \quad . \; . \quad (90)$$

При большихъ нагрузкахъ потеря $i_a^2 \cdot w_a$ на тепло Джоуля въ якорѣ превышаетъ всѣ потери и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія становится незначительнымъ. При незначительной нагрузкѣ первенствующее значеніе имѣетъ постоянная потеря $e \cdot i_m$ на тепло Джоуля въ обмоткѣ электромагнитовъ и потеря при холостомъ ходѣ P_0, такимъ образомъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія будетъ опять незначительнымъ. При средней нагрузкѣ, когда перемѣнныя потери на тепло Джоуля въ якорѣ будетъ приблизительно равны постояннымъ потерямъ, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія достигаетъ своей наибольшей величины.

Впрочемъ, необходимо замѣтить, что кривая коэффиціента полезнаго дѣйствія вблизи максимума на значительномъ протяженіи идетъ почти параллельно оси абсциссъ. Поэтому даже замѣтное колебаніе въ нагрузкѣ слабо вліяетъ на коэффиціентъ полезнаго дѣйствія.

Положимъ, машина имѣетъ напряженіе у зажимовъ 110 вольтъ, которое путемъ измѣненія регулировочнаго сопротивленія въ цѣпи возбужденія поддерживается постояннымъ. Сопротивленіе якоря вмѣстѣ съ щетками составитъ 0,2 ома. Характеристика машины пусть будетъ представлена на фиг. 130 и абсциссы, дѣленныя на 4 000, пусть представляютъ намъ намагнивающій токъ. Потери при холостомъ ходѣ пусть составляютъ 250 ваттъ. Эти послѣднія, такъ какъ измѣненіе возбужденія вліяетъ на нихъ только отчасти, должны считаться за постоянныя. Щетки могутъ располагаться по нейтральной линіи, такъ что реакція якоря будетъ равняться нулю. Требуется опредѣлить коэффиціентъ полезнаго дѣйствія при токѣ въ якорѣ въ 25, 50 и 75 амперъ.

Тогда имѣемъ:

i_a . . . . =	25	50	75
$i_a \cdot w_a$ . . . . . . =	5	10	15
$E = e + i_a \cdot w_a$ . . =	115	120	125
i_m изъ фиг. 130 =	1,2	1,5	1,9 [1]
$i = i_a - i_m$ . . . =	23,8	48,5	73,1
$e \cdot i$ . . . . . . =	2 620	5 335	8 040
$e \cdot i_m$ . . . . =	130	165	210

[1] Величина 1,9 получена интерполированіемъ.

$i_a^2 \cdot w_a$ . . . . . . =	125	500	1 120
P_0 . . . . =	250	250	250
ΣP . . . . =	3 125	6 250	9 620
$\eta = \frac{e \cdot i}{\Sigma P}$ . . . . . . =	0,84	0,856	0,838

Какъ видимъ, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія измѣняется очень мало около своего наибольшаго значенія, даже при сильномъ измѣненіи нагрузки. Поэтому, при конструированіи машинъ можно распредѣлять всю потерю произвольно на якорь и электромагниты. Но вслѣдствіе паденія напряженія въ якорѣ въ большинствѣ случаевъ не удается конструировать машины такимъ образомъ, чтобы онѣ при нормальной нагрузкѣ работали при наибольшемъ коэффиціентѣ полезнаго дѣйствія. Это паденіе напряженія въ вышеуказанномъ случаѣ для 50 амперъ будетъ около 10 вольтъ, т. е. 8% электродвижущей силы. Къ этому нужно добавить, что сравнительно большое сопротивленіе въ якорѣ вызываетъ развитіе въ немъ чрезмѣрнаго тепла Джоуля, для котораго уже наружная боковая поверхность якоря становится недостаточною. Вообще при распредѣленіи потерь на якорь и электромагниты руководствуются иными практическими соображеніями, чѣмъ полученіемъ наибольшаго коэффиціента полезнаго дѣйствія. Выполненныя на практикѣ машины работаютъ такимъ образомъ, что потеря въ якорѣ при нормальной работѣ меньше потерь на механическое треніе и на тепло Джоуля въ обмоткѣ электромагнитовъ. Поэтому при перегрузкѣ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія возрастаетъ.

Перейдемъ теперь къ отдѣленію опытнымъ путемъ потерь при холостомъ ходѣ. Если у насъ имѣются двѣ одинаковыя машины, то, соединивъ ихъ механически другъ съ другомъ, заставимъ первую машину работать въ качествѣ электродвигателя, при чемъ второй машины не будемъ возбуждать. Отнимемъ отъ мощности, сообщаемой двигателю, энергію, превратившуюся въ тепло Джоуля, $e \cdot i_m + i_o^2 \cdot w_a$. Опредѣляемая такимъ образомъ механическая мощность двигателя будетъ расходоваться на механическое треніе обѣихъ машинъ, на гистерезисъ и токи Фуко первой машины. Повторимъ затѣмъ опытъ, возбуждая при этомъ нормально вторую машину; тогда послѣдняя явится генераторомъ, работающимъ въ-холостую. Расходъ энергіи въ первой машинѣ увеличится поэтому на потери, на гистерезисъ и токи Фуко $P_h + P_w$ второй машины.

Послѣ опредѣленія подобнымъ образомъ, съ одной стороны энергіи, расходуемой на гистерезисъ и токи Фуко, а съ другой—на треніе, опытъ повторяютъ съ другимъ числомъ оборотовъ. При этомъ, конечно, возбу-

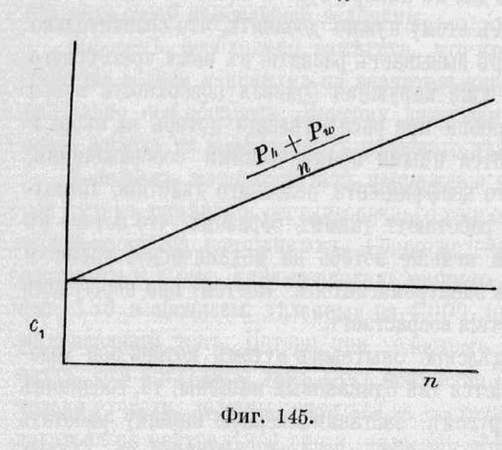
жденіе, а слѣдовательно и магнитные потоки машинъ остаются безъ измѣненія, измѣняется же число оборотовъ при помощи включенія въ цѣпь якоря двигателя добавочнаго сопротивленія.

Раздѣлимъ затѣмъ расходъ энергіи $P_h + P_w$ на число оборотовъ n и нанесемъ число оборотовъ n по оси абсциссъ, а величину $\frac{P_h + P_w}{n}$ по оси ординатъ (фиг. 145). Такъ какъ потеря энергіи на гистерезисъ пропорціональна первой степени, а потеря на токи **Фуко** второй степени числа оборотовъ, получимъ:

$$P_h + P_w = c_1 \cdot n + c_2 \cdot n^2 \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \quad (93)$$

Отсюда вытекаетъ:

$$\frac{P_h + P_w}{n} = c_1 + c_2 \cdot n.$$



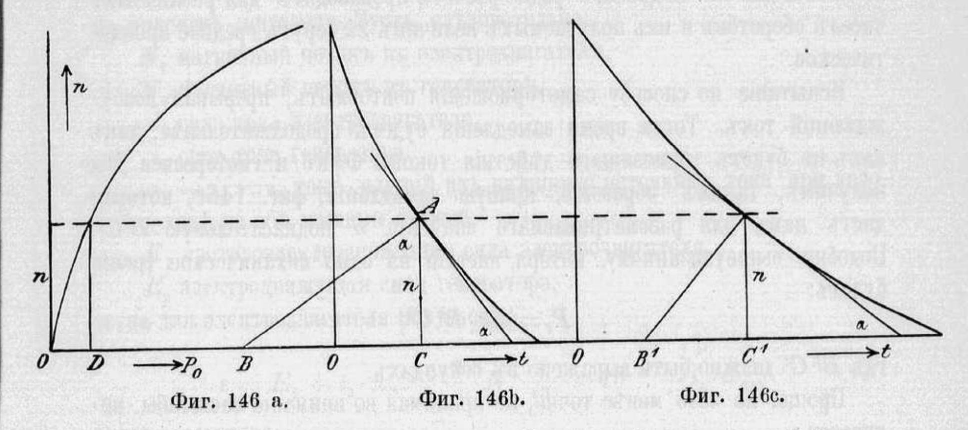
Фиг. 145.

Поэтому на фиг. 145 получаемъ прямую, отсѣкающую отъ ординаты отрѣзокъ c_1, представляющій потерю на гистерезисъ при одномъ оборотѣ въ минуту. Для полученія всей потери на гистерезисъ мы должны только умножить послѣдній на число оборотовъ и такимъ образомъ въ состояніи распредѣлить всю мощность при холостомъ ходѣ на отдѣльныя ея части.

Для отдѣленія потерь при наличности одной только машины прибѣгаютъ къ такъ называемому способу постепеннаго самоторможенія. Для этого мы выбираемъ опредѣленное возбужденіе, заставляемъ машину работать въ-холостую какъ двигатель и опредѣляемъ потери при холостомъ ея ходѣ P_0 при различномъ числѣ оборотовъ. Нанесемъ затѣмъ на фиг. 146а потерю P_0 по оси абсциссъ, а число оборотовъ n по оси ординатъ.

Превремъ токъ въ якорѣ, оставляя безъ измѣненія возбужденіе электромагнитовъ, предоставивъ машинѣ самой остановиться. Во время затуханія машины въ опредѣленные моменты мы наблюдаемъ при помощи счетчика число оборотовъ и затѣмъ откладываемъ время по оси абсциссъ, а соотвѣт-

ствующія числа оборотовъ въ минуту по оси ординатъ (фиг. 146b). Конечно, вмѣсто оборотовъ въ минуту могутъ наблюдаться пропорціональныя имъ напряженія у зажимовъ машины. При замедленіи движенія уменьшается скорость, и уменьшеніе живой силы равно работѣ, израсходованной въ данный промежутокъ времени на треніе, гистерезисъ и токи **Фуко**. Пусть черезъ опредѣленный промежутокъ времени t число оборотовъ будетъ $n = AC$ и живая сила въ джоуляхъ A измѣнится въ теченіе времени dt на величину dA. Тогда работа, расходуемая въ секунду на потери при холостомъ ходѣ, будетъ равна $\frac{dA}{dt}$. Съ другой же стороны живая сила про-



Фиг. 146 а. Фиг. 146b. Фиг. 146с.

порціональна квадрату числа оборотовъ. Такимъ образомъ, если k будетъ коэффиціентомъ пропорціональности, получаемъ:

$$A = k \cdot n^2,$$

$$dA = 2k \cdot n \cdot dn$$

$$\frac{dA}{dt} = 2k \cdot n \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Та же самая энергія, но съ обратнымъ знакомъ, будетъ равна энергіи P_0, сообщаемой при холостомъ ходѣ соотвѣтственно данному числу оборотовъ. Эта энергія опредѣляется на чертежѣ 146а отрѣзкомъ OD. Слѣдовательно, имѣемъ:

$$P_0 = -2k \cdot n \cdot \frac{dn}{dt} \, . \, . \, . \, . \, . \, . \quad (a)$$

Проведемъ въ разсматриваемой точкѣ A касательную и нормаль къ кривой замедленія вращенія на фиг. 146b [1]); тогда имѣемъ:

[1]) См. Arnold, «Die Gleichstrommaschine», I Band 2 Aufl. 1906, стр. 722.

$$tg\,\alpha = -\frac{dn}{dt} = \frac{BC}{AC}.$$

Такъ какъ $AC = n$, получаемъ:

$$-n\frac{dn}{dt} = BC.$$

Поэтому

$$P_0 = 2\,k \cdot BC.$$

Отсюда можно опредѣлить множитель $2k$, для чего измѣряемъ BC въ секундахъ и умножаемъ на квадратъ отношенія масштабовъ ординатъ и абсциссъ, такъ какъ въ уравненіи (a) важно знать масштабъ, какъ для n, такъ и для dn. Подобнаго рода расчетъ производятъ для различныхъ чиселъ оборотовъ и изъ получаемыхъ величинъ $2k$ берутъ среднее ариѳметическое.

Испытаніе по способу самоторможенія повторяютъ, прерывая возбуждающій токъ. Тогда время замедленія будетъ продолжительнѣе, такъ какъ не будетъ тормозящаго дѣйствія токовъ Фуко и гистерезиса. Мы получимъ, такимъ образомъ, кривую замедленія, фиг. 146c, которая дастъ намъ для разсматриваемаго значенія n подкасательную $B'C'$. Подобно вышеуказанному, потеря энергіи на одно механическое треніе будетъ:

$$P_r = 2k \cdot B'\,C',$$

гдѣ $B'\,C'$ должно быть выражено въ секундахъ.

Проще, но зато менѣе точно, не принимая во вниманіе масштабы, получаемъ:

$$\frac{P_r}{P_0} = \frac{B'\,C'}{B\,C}.$$

Иногда удобнѣе примѣнять способъ, который даетъ возможность производить испытаніе при полной нагрузкѣ даже тогда, когда не имѣется подъ рукою машины-двигателя надлежащей величины. Въ этомъ случаѣ двѣ одинаковыя испытываемыя машины заклиниваютъ на одномъ валу и при помощи внѣшняго источника тока первую машину заставляютъ вращаться въ качествѣ двигателя. Этотъ двигатель будетъ приводить въ движеніе вторую машину, работающую въ качествѣ динамо и питающую затѣмъ, въ свою очередь, своимъ токомъ первый двигатель. Внѣшній источникъ тока и вторая машина присоединены къ двигателю параллельно. Внѣшній источникъ тока, понятно, доставляетъ въ данномъ случаѣ энергію, обусловливаемую общею потерей въ обѣихъ машинахъ, которая можетъ

быть измѣрена. Возбужденіе обѣихъ машинъ при этомъ необходимо выбирать такимъ образомъ, чтобы число оборотовъ и сила тока обѣихъ машинъ соотвѣтствовали нормальному состоянію работы. Электродвижущая сила машины, работающей какъ электродвигатель, меньше напряженія у зажимовъ, такъ какъ послѣднее должно, согласно статьѣ 28, не только преодолѣть противоэлектродвижущую силу, но и доставить энергію, расходуемую на омическое паденіе напряженія въ якорѣ. Электродвижущая сила машины, работающей въ качествѣ генератора, наоборотъ, будетъ больше напряженія у зажимовъ. Такъ какъ число оборотовъ, число проволокъ и напряженіе у зажимовъ для обѣихъ машинъ одни и тѣ же, то генераторъ мы должны возбуждать нѣсколько сильнѣе двигателя, или наоборотъ: изъ обѣихъ машинъ сильнѣе возбуждаемая работаетъ въ качествѣ генератора, а слабѣе— въ качествѣ двигателя. Пусть, слѣдовательно:

N_1 магнитный потокъ въ электродвигателѣ,
N_2 магнитный потокъ въ генераторѣ,
i_1 сила тока электродвигателя,
i_2 сила тока генератора.
$i_1 - i_2 = i_0$ токъ, идущій изъ внѣшняго источника тока при холостомъ ходѣ на обѣ машины вмѣстѣ,
E_1 противоэлектродвижущая сила электродвигателя,
E_2 электродвижущая сила генератора;

тогда для электродвигателя получаемъ:

$$e = E_1 + i_1 \cdot w_a = \frac{p}{a} \cdot N_1 \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8} + i_1 \cdot w_a.,$$

а для генератора:

$$e = E_2 - i_2 \cdot w_a = \frac{p}{a} \cdot N_2 \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8} - i_2 \cdot w_a.$$

Складывая оба эти уравненія, получаемъ:

$$2e = \frac{p}{a}(N_1 + N_2)\frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8} + i_0 \cdot w_a.$$

Пренебрежемъ чрезвычайно малою величиною $i_0 \cdot w_a$; тогда получимъ:

$$\frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8} = \frac{e}{\frac{N_1 + N_2}{2}}.$$

Слѣдовательно, число оборотовъ обратно пропорціонально среднему ариѳметическому выбранныхъ потоковъ N_1 и N_2. Подставимъ найденное зна-

ченіе для $\frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8}$ во второе уравненіе для e и, опредѣляя изъ него i_2, будемъ имѣть:

$$i_2 = \frac{N_2 - N_1}{N_1 + N_2} \cdot \frac{e}{w_a}.$$

Слѣдовательно, въ то время какъ число оборотовъ выражается суммою выбранныхъ магнитныхъ потоковъ, сила тока генератора опредѣляется частнымъ $\frac{N_2 - N_1}{N_2 + N_1}$. Поэтому мы имѣемъ возможность опредѣлять съ одной стороны число оборотовъ, а съ другой силу тока, для чего необходимо опредѣлить потери. Измѣренное при этомъ произведеніе $e \cdot i_0$ представляетъ собою всю мощность, расходуемую на потери обѣихъ машинъ.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

62. Направленіе вращенія электродвигателей.

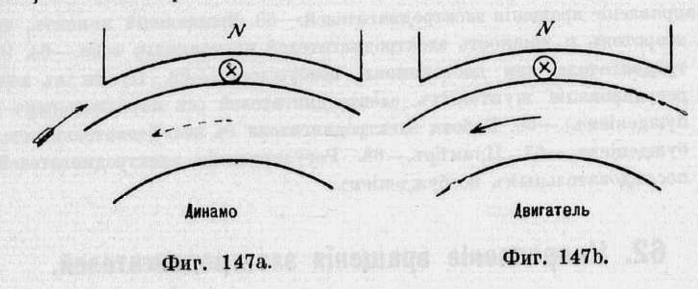
Электродвигатели постояннаго тока по конструкціи своей не отличаются отъ генераторовъ того же тока. Тотъ фактъ, что машина, работающая въ данный моментъ какъ двигатель, тотчасъ же можетъ работать какъ генераторъ, даетъ намъ возможность ограничиться лишь краткимъ изложеніемъ главы объ электродвигателяхъ.

Особенный интересъ для насъ представляютъ механическія свойства двигателей, какъ-то: направленіе вращенія, вращающій моментъ, число оборотовъ и механическая мощность. Поэтому въ послѣдующемъ мы поставимъ себѣ задачей установить зависимость этихъ механическихъ свойствъ отъ электрическихъ и магнитныхъ соотношеній.

Чтобы опредѣлить направленіе вращенія двигателя, мы припомнимъ, что на вращеніе динамо, доставляющей токъ, согласно закону сохраненія энергіи, требуется затрата извѣстной механической работы. Индуктированный этимъ движеніемъ токъ затормаживаетъ вращеніе, такъ какъ магнитное поле дѣйствуетъ на проводникъ съ нѣкоторымъ усиліемъ, направленнымъ прямо противоположно вращенію. Положимъ, что динамо,

представленное на фиг. 147а, вращается по часовой стрѣлкѣ; тогда токъ въ проводникѣ передъ сѣвернымъ полюсомъ пойдетъ отъ насъ за плоскость чертежа, а передъ южнымъ полюсомъ изъ-за плоскости чертежа къ намъ. Этотъ токъ въ связи съ магнитнымъ потокомъ создаетъ усиліе, направленіе котораго мы опредѣлимъ при помощи правила Ампера или закона Ленца. Это усиліе будетъ стремиться повернуть якорь въ направленіи, противоположномъ часовой стрѣлкѣ, т. е. по направленію, указанному пунктирной стрѣлкой. Машина какъ бы стремится начать работать какъ электродвигатель, но это ей не удается, ибо ея усилія къ тому преодолѣваются машиной-двигателемъ.

Это усиліе, наоборотъ, стало бы свободнымъ, если мы положимъ, что машина-двигатель мгновенно будетъ остановлена, а якорь будетъ питаться отъ какого-либо внѣшняго источника тока. При этомъ направленія тока въ якорной и электромагнитной обмоткахъ должны быть такими же, какъ



Фиг. 147а. Фиг. 147b.

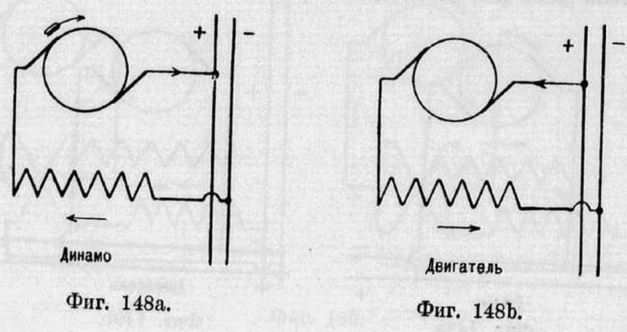
и у машины во время работы ея какъ динамо (фиг. 147b). Тогда электродвигатель придетъ въ движеніе и вращеніе его при этихъ условіяхъ обязательно будетъ происходить въ направленіи, обратномъ часовой стрѣлкѣ, т. е. по направленію стрѣлки на фиг. 147b. На основаніи всего сказаннаго заключаемъ:

Машина, какъ двигатель, при одинаковыхъ полюсахъ и одинаковомъ направленіи тока въ якорѣ, вращается въ сторону, противоположную той, въ которую она вращалась бы, работая какъ динамо. То же самое будетъ имѣть мѣсто и въ томъ случаѣ, если токъ въ якорѣ и электромагнитахъ одновременно перемѣнитъ свое направленіе на противоположное. Но изъ сказаннаго нельзя все же дѣлать такого поспѣшнаго заключенія,—это очень легко можетъ случится съ начинающими,—что вообще всякая машина непремѣнно мѣняетъ направленіе своего вращенія, какъ только она, прекращая работать какъ генераторъ, начинаетъ работать какъ двигатель. Но мы ясно указали, что перемѣна

вращенія послѣдуетъ только тогда, когда направленіе тока въ якорѣ и электромагнитахъ электродвигателя одинаково съ направленіемъ ихъ у генератора.

Обратимся теперь къ частнымъ случаямъ—къ электродвигателямъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ и шунтовымъ, и посмотримъ, подтверждается ли сдѣланное нами заключеніе и въ какихъ случаяхъ.

У двигателей съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ якорь и электромагниты включены послѣдовательно другъ съ другомъ. Предположимъ теперь, что представленная на фиг. 148а машина съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, работая какъ генераторъ, вращается по часовой стрѣлкѣ, и что щетка, расположенная справа, будетъ положительною. Заставимъ затѣмъ эту машину работать, не измѣняя схемы соединеній, какъ двигатель. На основаніи вышесказаннаго, для направленія вращенія безразлично, какимъ образомъ мы присоединимъ къ зажимамъ дви-



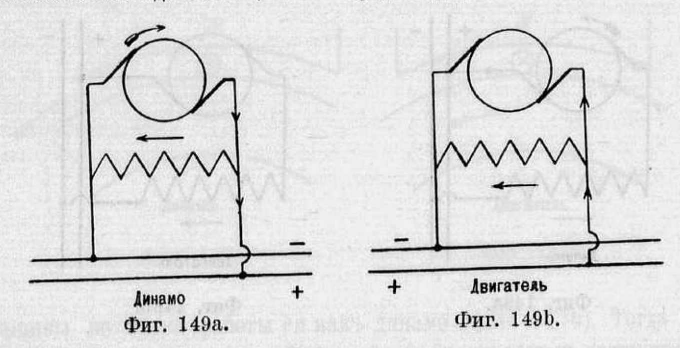
Фиг. 148а. Фиг. 148b.

гателя главную цѣпь. Самымъ простымъ, конечно, будетъ случай, когда схема соединеній останется прежней (фиг. 148b). Тогда токъ въ якорѣ и электромагнитахъ двигателя по сравненію съ динамо будетъ обратнаго направленія. Результатъ по отношенію направленія вращенія получится такой же, какъ если бы токъ въ обѣихъ частяхъ былъ такого же направленія, какъ въ динамо, ибо какъ сказано выше, одновременное измѣненіе направленія тока въ якорѣ и электромагнитахъ не измѣняетъ направленія вращенія. Слѣдовательно машина съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, вращается безъ измѣненіи схемы включенія, какъ двигатель, въ направленіи, обратномъ динамо, т. е. противъ щетокъ.

Для вращенія въ томъ же направленіи, что и раньше, необходимо, на фиг. 148b, переключить обмотки электромагнитовъ. Этимъ въ то же время достигаютъ того, что направленіе тока въ обмоткѣ электромагнитовъ у

двигателя и генератора остается безъ измѣненія. Это очень важно, такъ какъ гистерезисъ въ желѣзѣ затрудняетъ перемагничиваніе, и потому можетъ оказаться, что послѣ перемагничиванія при прочихъ равныхъ условіяхъ магнитный потокъ въ желѣзѣ будетъ слабѣе прежняго.

Разсмотримъ теперь машину съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, работающую какъ двигатель и вращающуюся въ томъ же направленіи, что и генераторъ. Это очень важный на практикѣ случай, такъ какъ торможеніе двигателей съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ основано на томъ, что выключенный изъ цѣпи электродвигатель заставляютъ работать, какъ динамо, на цѣпь искусственнаго сопротивленія. Напримѣръ, у трамвая живая сила вагона переходитъ въ электрическую энергію, и вагонъ, благодаря этому, затормаживается. Для этого необходимо переключить машину, такъ какъ иначе она, какъ генераторъ, не пойдетъ. До тѣхъ поръ, пока она работала какъ двигатель, ея электродвижущая сила, согласно ст. 28,

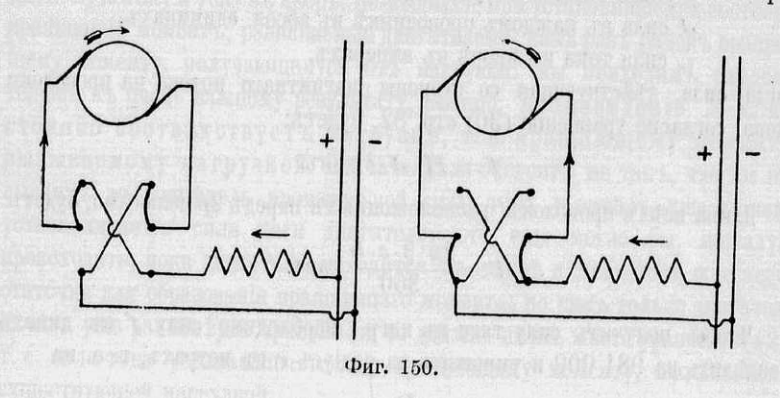


Фиг. 149a. Фиг. 149b.

была направлена противоположно току. Если теперь мы включимъ ее на сопротивленіе и заставимъ ее самовозбуждаться, то направленіе ея вращенія будетъ прежнее. Точно также силовыя линіи остаточнаго магнетизма будутъ имѣть то же направленіе, что и силовой потокъ при прежней работѣ какъ двигателя. Поэтому и электродвижущая сила, если мы пожелаемъ пустить машину работать какъ генераторъ, должна имѣть то же направленіе, что и раньше, т. е. токъ, создаваемый остаточнымъ магнетизмомъ, будетъ направленія противоположнаго прежнему току двигателя. Послѣдствіемъ этого явится не усиленіе, а ослабленіе остаточнаго магнетизма. Въ силу этого необходимо обмотку электромагнитовъ переключать, когда желаютъ отъ движенія перейти къ торможенію. Такъ какъ новая цѣпь состоитъ изъ якоря, обмотки электромагнитовъ и сопротивленія, то, понятно, можно вмѣсто обмотки электромагнитовъ переключать токъ якоря. Но въ виду того, что теперь якорь, какъ генераторъ тока, является самой пре-

обладающей, по своему значенію, частью, то переключать электромагниты удобнѣй, чѣмъ якорь.

Разсмотримъ теперь работу двигателей съ параллельнымъ возбужденіемъ. Одинъ только бѣглый взглядъ на фиг. 149a и 149b указываетъ, что токъ въ электромагнитахъ у генератора и двигателя остается безъ измѣненія, если мы при той же схемѣ соединеній станемъ пользоваться шунтовой машиной, какъ двигателемъ. Токъ въ якорѣ, напротивъ, будетъ имѣть въ обѣихъ машинахъ направленіе, противоположное другъ другу. Если бы токъ былъ повсюду одинаковъ, то двигатель вращался бы въ сторону, противоположную динамо. Но въ этомъ случаѣ, когда измѣненіе произошло только въ одномъ якорѣ, машина вращается, работая какъ двигатель, въ томъ же направленіи, что и динамо. Генера-



Фиг. 150.

торъ съ параллельнымъ возбужденіемъ, работая какъ двигатель, вращается по направленію щетокъ, и, равнымъ образомъ, двигатель съ параллельнымъ возбужденіемъ можно вращать въ томъ же направленіи, при той же схемѣ соединеній, и для работы въ качествѣ генератора.

Въ концѣ намъ остается упомянуть еще только объ управленіи электродвигателемъ. Если бы мы пожелали для этой цѣли переключить главные провода, то токъ въ якорѣ, а также въ обмоткѣ электромагнитовъ, пошелъ бы по направленію противоположному, и направленіе вращенія осталось бы прежнее. Слѣдовательно, необходимо переключить или только токъ въ якорѣ, или только токъ въ электромагнитахъ. Обыкновенно переключаютъ изъ-за вышеупомянутаго вліянія гистерезиса токъ въ якорѣ (фиг. 150).

63. Вращающій моментъ, число оборотовъ и мощность двигателя постояннаго тока.

Уравненіе (30) на стр. 82, въ ст. 25, даетъ возможность просто опредѣлить по магнитному потоку, числу проволокъ и силѣ тока вращающій моментъ электродвигателя. Мы теперь выведемъ болѣе общее выраженіе для вращающаго момента. Пусть:

H напряженіе поля въ междужелѣзномъ пространствѣ,

b длина якоря въ сантиметрахъ,

D діаметръ якоря въ сантиметрахъ,

z все число внѣшнихъ проводниковъ на якорѣ,

β уголъ обхвата якоря полюсомъ,

J сила въ каждомъ проводникѣ въ абсол. единицахъ,

i_a сила тока въ якорѣ въ амперахъ.

Тогда сила, дѣйствующая со стороны магнитнаго потока на проволоки якоря, согласно уравненію (30) стр. 82, будетъ:

$$f = H \cdot J \cdot l \text{ динъ.}$$

Длина всѣхъ проволокъ, расположенныхъ передъ $2p$ полюсами, будетъ:

$$l = \frac{2p \cdot \beta \cdot z \cdot b}{360} \text{ сант.}$$

Чтобы получить силу тяги въ клгр., необходимо силу f въ динахъ раздѣлить на 981 000 и умножить на радіусъ r въ метрахъ, т. е. на

$$\frac{D}{2 \cdot 100}.$$

Вращающій моментъ тогда въ клг.-м. будетъ:

$$M_d = H \cdot J \cdot \frac{2p \cdot \beta \cdot z \cdot b}{360} \cdot \frac{D}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1}{981\,000}.$$

Магнитный потокъ N одного полюса равняется произведенію поверхности полюса на напряженіе поля передъ полюсами:

$$N = \frac{N \cdot \pi \cdot \beta \cdot b}{360} H.$$

Съ другой стороны, если якорь распадается на $2a$ параллельныхъ вѣтвей, получаемъ:

$$J = \frac{i_a}{10 . 2a}.$$

Тогда уравненіе для вращающаго момента приметъ видъ:

$$M_d = \frac{p}{a} \cdot \frac{N \cdot z \cdot i_a}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot 10^{-8} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (42)$$

Для послѣдовательной обмотки a равно единицѣ, а для параллельной равно p.

Эти уравненія представляютъ полный вращающій моментъ, развиваемый машиной. Полезный вращающій моментъ меньше на величину, необходимую для вращенія двигателя при холостомъ ходѣ.

Переставимъ мѣстами обѣ части этого уравненія, тогда увидимъ, что выведенное уравненіе для вращающаго момента показываетъ, во-первыхъ, что развиваемый двигателемъ вращающій моментъ пропорціоналенъ магнитному потоку и току въ якорѣ. Во-вторыхъ, при установившемся состояніи вращающій моментъ, развиваемый двигателемъ, какъ разъ равенъ вращающему моменту, получающемуся отъ нагрузки. Мы приходимъ, слѣдовательно, къ очень важному результату, именно: произведеніе $N \cdot i_a$ постоянно соотвѣтствуетъ нагрузкѣ, т. е. вращающему моменту, вызываемому нагрузкой. Значитъ дѣло обстоитъ не такъ, что мы посылаемъ въ двигатель произвольной силы токъ, и затѣмъ уже по нему устанавливается сила тяги двигателя; это еще могло бы, пожалуй, происходить, пока двигатель находится въ покоѣ и сила тока еще недостаточна для образованія вращающаго момента; но какъ только двигатель началъ уже равномѣрно вращаться, то должно имѣть мѣсто уравненіе (42), т. е. сила тока устанавливается по вращающему моменту, вызываемому существующей нагрузкой.

Но при этомъ остается еще неразрѣшеннымъ вопросъ, почему же это въ якорь притекаетъ токъ силы, какъ разъ необходимой для существующей нагрузки, а не больше или меньше. Здѣсь какъ бы существуетъ какой-то регуляторъ, который пропускаетъ какъ разъ необходимое количество электричества. Но вѣдь въ двигателѣ имѣется противоэлектродвижущая сила, зависящая, какъ и регуляторъ паровой машины, отъ числа оборотовъ. Очевидно, что здѣсь безразлично, будетъ ли машина приводиться въ движеніе извнѣ, какъ генераторъ, или будетъ вращаться благодаря взаимодѣйствію между токомъ въ якорѣ и магнитнымъ потокомъ. Въ обоихъ случаяхъ силовыя линіи пересѣкаются проволоками якоря и возбуждаютъ въ послѣднихъ электродвижущую силу. Такимъ образомъ, двигатель не только походитъ на динамо по своей конструкціи, и машина не только можетъ работать то какъ двигатель, то какъ генераторъ, но, работая какъ двигатель, она стремится начать работать,

какъ генераторъ. Правда, въ этомъ случаѣ машина не будетъ доставлять тока, а создавать только электродвижущую силу. Что эта электродвижущая сила противодѣйствуетъ напряженію у зажимовъ и току, можно видѣть изъ правила Фарадея. Проще же это явствуетъ изъ того положенія, что нельзя ожидать, чтобы электродвижущая сила двигателя усилила токъ. Поэтому, такъ какъ двигатель совершаетъ механическую работу, то немыслимо расчитывать получить отъ него и токъ, который бы питалъ намъ, напримѣръ, включенныя лампы.

Противоэлектродвижущая сила, конечно, пропорціональна числу оборотовъ, и это является причиною, почему постоянно точно устанавливается сила тока, какъ разъ необходимая для вращающаго момента. Если, напримѣръ, нагрузка двигателя увеличится, тогда существовавшій до сихъ поръ вращающій моментъ не будетъ болѣе достаточенъ для преодолѣнія нагрузки; произойдетъ мгновенная задержка, вслѣдствіе чего уменьшится число пересѣкаемыхъ силовыхъ линій, а за этимъ и противоэлектродвижущая сила. Благодаря этому окажется возможнымъ усиленіе тока до размѣра, соотвѣтствующаго новому вращающему моменту.

При уменьшеніи нагрузки, наоборотъ, вращающій моментъ, развиваемый въ данное мгновеніе двигателемъ, будетъ великъ. Двигатель, поэтому, начнетъ вращаться быстрѣе и усиливающаяся благодаря этому противоэлектродвижущая сила будетъ уменьшать силу тока, какъ бы затормаживать поступленіе тока. При установившемся состояніи снова развиваемый двигателемъ вращающій моментъ будетъ совершенно точно равенъ вращающему моменту, требуемому нагрузкою, но не нѣсколько больше, какъ это считаютъ многіе начинающіе. Но подъ нагрузкою тогда, конечно, нужно подразумѣвать вращающій моментъ, прилагаемый къ ременному шкиву, включая сюда вращающій моментъ тренія при холостомъ ходѣ.

Число оборотовъ получается изъ противоэлектродвижущей силы, согласно уравненію (38), стр. 162:

$$E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8}.$$

При этомъ противоэлектродвижущая сила получается изъ тока въ якорѣ: путемъ слѣдующаго разсужденія: напряженіе сѣти e, приложенное къ якорю, должно преодолѣть противоэлектродвижущую силу E и покрыть омическое паденіе напряженія $i_a \cdot w_a$, т. е.

$$e = E + i_a \cdot w_a \quad \ldots \ldots \quad (a)$$

Тогда изъ обоихъ послѣднихъ уравненій получаемъ:

$$n = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot N \cdot z} = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot N \cdot z} \quad \ldots \ldots (43)$$

Уравненіе указываетъ, что измѣненіе нагрузки, а, слѣдовательно, и тока въ якорѣ, вызываетъ не мгновенное только, но продолжительное измѣненіе числа оборотовъ, хотя послѣднее измѣненіе бываетъ иногда и незначительно.

Намъ предстоитъ теперь еще вывести уравненіе для механической мощности. При разсмотрѣніи въ общемъ видѣ механическихъ величинъ двигателя мы намѣренно выдвинули на первый планъ вращающій моментъ, хотя обыкновенно за самую важную величину у него рекомендуется принимать мощность. Но для болѣе легкаго уясненія работы двигателя лучше исходить изъ разсмотрѣнія вращающаго момента, такъ какъ мощность всегда выражается произведеніемъ двухъ перемѣнныхъ величинъ: вращающаго момента и числа оборотовъ.

Если, теперь, M_d вращающій моментъ въ клг-мтр и

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{n}{60}$$

угловая скорость, то механическая мощность тогда въ клгр-мтр въ секунду, согласно извѣстному закону механики, будетъ равна $M_d \cdot \omega$. Для полученія механической мощности P въ ваттахъ необходимо, согласно статьѣ 41, умножить еще на 9,81; тогда имѣемъ:

$$P = M_d \cdot \omega \cdot 9{,}81 = M_d \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot 9{,}81 \text{ ваттъ.}$$

Теперь важно для насъ выразить эту мощность въ видѣ функціи электрическихъ величинъ. Для этого умножимъ уравненіе (а) на i_a; тогда получимъ:

$$e \cdot i_a = E \cdot i_a + i_a^2 \cdot w_a.$$

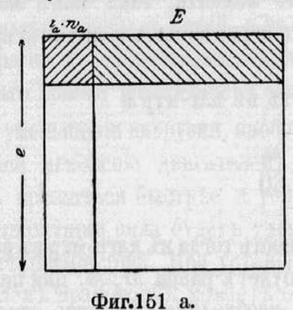
Въ этомъ уравненіи произведеніе $e \cdot i_a$ представляетъ собою мощность, сообщаемую якорю, а произведеніе $i_a^2 \cdot w_a$ энергію, перешедшую въ якорѣ въ тепло Джоуля. Поэтому произведеніе $E \cdot i_a$ должно представлять расходъ электрической энергіи, превращаемый двигателемъ въ механическую энергію. Послѣдняя заключаетъ въ себѣ полезную мощность и энергію, расходуемую при холостомъ ходѣ.

Мы можемъ полученныя нами уравненія тотчасъ же повѣрить при помощи закона сохраненія энергіи. Электрическая энергія $E \cdot i_a$ должна равняться механической мощности, поэтому должно имѣть мѣсто уравненіе:

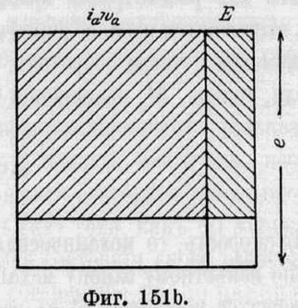
$$E \cdot i_a = M_d \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot 9{,}81.$$

Если подставимъ, теперь, для E и M_d соотвѣтствующія выраженія изъ уравненій (38) на стр. 162 и (42) на стр. 261, то обѣ части окажутся тождественными.

Что касается зависимости мощности отъ тока въ якорѣ, то оказывается, что мощность при очень маломъ вращающемъ моментѣ, слѣдовательно, при незначительномъ токѣ въ якорѣ, также очень мала. Съ увеличеніемъ нагрузки увеличивается механическая мощность, пока она, наконецъ, вслѣдствіе уменьшенія числа оборотовъ при очень большой нагрузкѣ, снова



Фиг.151 a.



Фиг. 151b.

не пойдетъ на убыль. Для того, чтобы опредѣлить, когда мощность будетъ имѣть свое наибольшее значеніе, продифференцируемъ уравненіе

$$P = E \cdot i_a = e \cdot i_a - i_a^2 w_a$$

по i_a и приравняемъ первую производную нулю. Тогда получимъ:

$$P' = e - 2 i_a \cdot w_a = 0$$

или

$$i_a \cdot w_a = \frac{e}{2}.$$

Для этого случая $i_a \cdot w_a$ равно также E.

Этотъ же результатъ мы имѣемъ изъ фиг. 151a и 151b, гдѣ напряженіе у зажимовъ является сторонами квадрата и разложено на омическое паденіе напряженія и на противоэлектродвижущую силу. Не принимая во вниманіе множитель w_a, мы можемъ считать, что заштрихованный прямоугольникъ будетъ равенъ механической мощности, а заштрихованный квадратъ потерѣ на тепло Джоуля. Изъ чертежа видно, что для большихъ и малыхъ значеній i_a заштрихованный прямоугольникъ особенно малъ. Прямоугольникъ достигаетъ своего наибольшаго размѣра тогда, когда самъ превратится въ квадратъ, т. е. когда $i_a \cdot w_a = E$. При этомъ условіи и механическая мощность имѣетъ свое наибольшее значеніе. Понятно, этотъ случай находится внѣ предѣловъ работы, такъ какъ двигатель не выдержитъ столь большой силы тока. Кромѣ того при $E = i_a \cdot w_a$ половина сообщаемой энергіи перейдетъ въ тепло Джоуля. Тогда коэффиціентъ полезнаго дѣйствія будетъ равенъ 0,5.

64. Электродвигатель при постоянномъ возбужденіи.

Въ этой главѣ мы разсмотримъ электродвигатель, обмотка электромагнитовъ котораго включена въ цѣпь съ постояннымъ напряженіемъ. Первымъ долгомъ слѣдуетъ выяснить работу электродвигателя при включеніи якоря непосредственно въ эту цѣпь.

Полный вращающій моментъ такого электродвигателя будетъ, согласно уравн. (42) стр. 261, равенъ:

$$M_d = \frac{p}{a} \cdot \frac{N \cdot z \cdot i_a}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot 10^{-8}.$$

Въ виду того, что намагничивающій токъ и магнитный потокъ въ этомъ случаѣ постоянны, полный вращающій моментъ пропорціоналенъ току въ якорѣ. Если нанесемъ токъ въ якорѣ по оси абсциссъ, а полный вращающій моментъ M_d по оси ординатъ, то получимъ на фиг. 152a прямую, проходящую черезъ начало координатъ.

Полезный вращающій моментъ M_n будетъ на величину, затрачиваемую при холостомъ ходѣ на треніе, гистерезисъ и токи Фуко, меньше. Если i_0 токъ въ якорѣ при холостомъ ходѣ, то полезный вращающій моментъ пропорціоналенъ разности $i_a - i_0$. Откладывая полезный вращающій моментъ M_n по оси ординатъ, мы получимъ также прямую, параллельную первой прямой и отсѣкающую на оси абсциссъ отрѣзокъ i_0 (фиг. 152a).

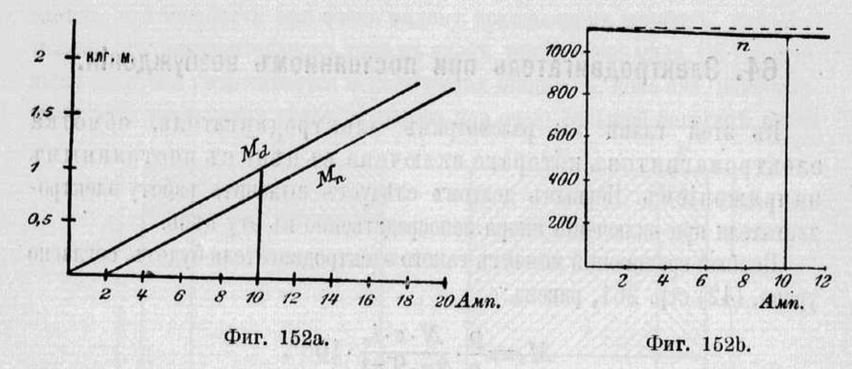
Число оборотовъ, согласно уравненію (43), стр. 263, будетъ:

$$n = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot N \cdot z}.$$

Такъ какъ у даннаго электродвигателя магнитный потокъ опять постоянный, то число оборотовъ пропорціонально электродвижущей силѣ.

Уменьшеніе числа оборотовъ по сравненію съ холостымъ ходомъ пропорціонально тогда омическому паденію напряженія $i_a \cdot w_a$. Нанося токъ въ якорѣ по оси абсциссъ, а число оборотовъ по оси ординатъ, получаемъ наклонную прямую фиг. 152b. Такъ какъ омическое паденіе напряженія всегда очень незначительно, то электродвигатель съ постояннымъ возбужденіемъ въ предѣлахъ между работой въ-холостую и работой при полной нагрузкѣ имѣетъ почти постоянное число оборотовъ.

Полезная мощность въ лошад. силахъ получается или изъ полезнаго вращающаго момента и угловой скорости, т. е. равна $\frac{M_n \cdot 2\pi \cdot n}{75 \cdot 60}$,



Фиг. 152a. Фиг. 152b.

или изъ противоэлектродвижущей силы и рабочаго тока $i_a - i_0$, т. е. равна $\frac{E \cdot (i_a - i_0)}{736}$.

Полный коэффиціентъ полезнаго дѣйствія η электродвигателя съ постояннымъ возбужденіемъ, если i обозначаетъ сумму i_a тока въ якорѣ и i_m въ обмоткѣ электромагнитовъ, будетъ:

$$\eta = \frac{E \cdot (i_a - i_0)}{e \cdot i} = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot (i_a - i_0)}{e \cdot (i_a + i_m)}.$$

При холостомъ ходѣ, т. е. когда $i_a = i_0$, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія равенъ нулю. Наконецъ, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія равенъ нулю также тогда, когда нагрузка настолько велика, что даже самый сильный токъ, который, впрочемъ, якорь и не сможетъ выдержать,

$$i_a = \frac{e}{w_a}$$

не можетъ привести въ движеніе электродвигатель. Полный коэффиціентъ полезнаго дѣйствія долженъ имѣть, слѣдовательно, свое наибольшее зна-

ченіе при средней нагрузкѣ. Для того, чтобы найти наиболѣе выгодную нагрузку, т. е. наиболѣе выгодный токъ въ якорѣ, раскроемъ скобки въ числителѣ выраженія для η и, пренебрегая незначительной величиною $i_a \cdot i_0 \cdot w_a$, получаемъ:

$$\eta = \frac{e \cdot i_a - i_a^2 \cdot w_a - e \cdot i_0}{e \cdot (i_a + i_m)}.$$

Продифференцируемъ затѣмъ послѣднее выраженіе по i_a и приравняемъ производныя нулю, при чемъ для упрощенія отбросимъ въ знаменателѣ множитель e. Тогда получаемъ:

$$\eta' = \frac{(e - 2i_a \cdot w_a) \cdot (i_a + i_m) - (e \cdot i_a - i_a^2 \cdot w_a - e \cdot i_0)}{(i_a + i_m)^2}$$

Это выраженіе будетъ равняться нулю, когда числитель будетъ равенъ нулю. Раскроемъ скобки въ числителѣ и приравняемъ его нулю; тогда будемъ имѣть, пренебрегая незначительной величиной $2i_a \cdot i_m \cdot w_a$:

$$i_a^2 \cdot w_a = e \cdot (i_m + i_0).$$

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія будетъ имѣть наибольшее значеніе тогда, когда перемѣнныя потери на тепло Джоуля въ якорѣ равны постоянной потерѣ на механическое треніе и на нагрѣваніе обмотки электромагнитовъ.

Разъяснимъ сдѣланные нами выше выводы на численномъ примѣрѣ. Пусть при двухполюсномъ двигателѣ ($p = 1$, $a = 1$):

$$e = 110 \qquad N = 2 \cdot 10^6 \qquad z = 300$$
$$w_a = 0{,}3 \qquad i_m = 1 \qquad i_0 = 2.$$

Тогда полный вращающій моментъ:

$$M_d = \frac{p}{a} \cdot \frac{N \cdot z \cdot i_a}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot 10^{-8} = 0{,}1 \cdot i_a \text{ клг-мтр.}$$

Полезный вращающій моментъ:

$$M_n = 0{,}1\,(i_a - i_0) = 0{,}1 \cdot i_a - 0{,}2,$$

число оборотовъ:

$$n = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot 60 \cdot 10_8}{p/a \cdot N \cdot z} = 1100 - 3i_a.$$

Если, напримѣръ, нормальный токъ, на который расчитанъ двигатель, равенъ 10 амперамъ, то для нормальной нагрузки полный вращающій моментъ будетъ равенъ 1 клг-мтр, полезный вращающій моментъ 0,8 клг-мтр и число оборотовъ 1 070. Паденіе числа оборотовъ сравнительно съ холо-

стымъ ходомъ составитъ, слѣдовательно, 30 оборотовъ на 1100 или въ круглыхъ числахъ 3% (ср. фиг. 152a и 152b).

Полный коэффиціентъ полезнаго дѣйствія въ этомъ случаѣ при токѣ въ якорѣ въ 10 амперъ будетъ:

$$\eta = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot (i_a - i_0)}{e \cdot (i_a + i_m)} = \frac{107 \cdot 8}{110 \cdot 11} = 0,7.$$

Для полученія условій для максимума коэффиціента полезнаго дѣйствія, опредѣлимъ сумму постоянныхъ потерь:

$$e \cdot i_0 + e \cdot i_m = 330.$$

При наиболѣе выгодномъ коэффиціентѣ полезнаго дѣйствія потеря $i_a^2 \cdot w_a$ равна также 330 ваттъ. Отсюда получаемъ:

$$i_a = \sqrt{\frac{330}{0,3}} = 33 \text{ амперъ}.$$

Прибавимъ къ этому токъ въ электромагнитахъ, равный 1 амперу, тогда полный токъ составитъ 34 ампера, и сообщаемая энергія будетъ:

$$e \cdot i = 110 \cdot 34 \cdot = 3\,740 \text{ ваттъ}.$$

Отнимая отъ этой энергіи потери, составляющія 2·330 ваттъ, получаемъ полезную мощность въ 3 740 — 660 = 3 080 ваттъ и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія будетъ:

$$\eta_{max} = \frac{3\,080}{3\,740} = 0,825.$$

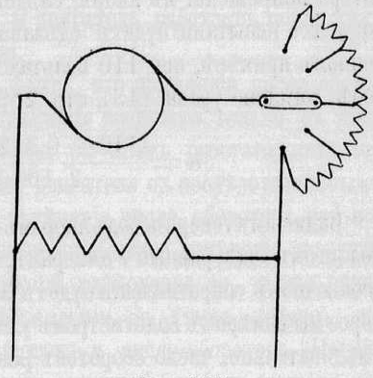
Полезная мощность при этомъ 3 080 : 736 = 4,2 лош. силъ. Паденіе числа оборотовъ, выраженное въ процентахъ, по сравненію съ абсолютнымъ холостымъ ходомъ, согласно урав. (43), стр. 263, равно процентному паденію напряженія въ якорѣ, т. е. 0,3·33 на 110 или 9%.

Интересно теперь изслѣдовать, какимъ образомъ измѣняется полный коэффиціентъ полезнаго дѣйствія, если электродвигатель будетъ нагруженъ вполовину ($i_a = 17$) или перегруженъ вдвойнѣ ($i_a = 66$). Тогда получаемъ:

i_a	=	17 или	66 амперъ	
$i = i_a + i_m$	=	18 »	67 »	
$i_a - i_0$	=	15 »	64 »	
$E = e - i_a \cdot w_a$	=	105 »	90 вольтъ	
$\eta = \frac{E \cdot (i_a - i_0)}{e \cdot i}$	=	0,8 »	0,78.	

Какъ видимъ, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія измѣняется очень мало при измѣненіи нагрузки въ большихъ предѣлахъ. Поэтому при конструированіи можно не придерживаться строго условія, что нормальная нагрузка должна совпадать съ наилучшимъ коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія. Важнѣе обращать вниманіе на возможно меньшее паденіе числа оборотовъ по сравненію съ холостымъ ходомъ, такъ какъ двигатели обыкновенно работаютъ при нагрузкѣ меньшей, чѣмъ та, которая соотвѣтствуетъ наилучшему коэффиціенту полезнаго дѣйствія.

Разсмотримъ теперь работу электродвигателя, обмотка электромагнитовъ котораго присоединена непосредственно къ постоянному напряженію у зажимовъ, а якорь присоединенъ къ напряженію у зажимовъ при помощи регулировочнаго сопротивленія (фиг. 153). Независимо отъ того, работаетъ ли двигатель съ нагрузкой или безъ нагрузки, мы дѣлаемъ одинаково неожиданное для насъ наблюденіе, что измѣненіе добавочнаго сопротивленія не производитъ никакого дѣйствія на силу тока. И уравненіе (42), на стр. 261, требуетъ, чтобы сила тока устанавливалась исключительно по нагрузкѣ, слѣдовательно, чтобы сила тока не измѣнялась, когда при постоянной нагрузкѣ измѣняется добавочное сопротивленіе. Хотя въ первое мгновеніе при уменьшеніи сопротивленія сила тока немного увеличивается, но вслѣдствіе этого вращающій моментъ, развиваемый якоремъ, будетъ больше требуемаго нагрузкою. Якорь, такимъ образомъ, пріобрѣтаетъ ускореніе и довольно долго вращается съ повышеннымъ числомъ оборотовъ. Благодаря этому увеличившемуся числу оборотовъ, возрастаетъ противоэлектродвижущая сила, и сила тока снова уменьшается до прежней величины, которая соотвѣтствуетъ вращающему моменту. У двигателя съ постояннымъ возбужденіемъ измѣненіе силы тока возможно получить только измѣненіемъ нагрузки.



Фиг. 153.

Число оборотовъ, въ сильной степени зависитъ отъ добавочнаго сопротивленія. Напряженіе въ сѣти e идетъ не только на преодолѣніе противоэлектродвижущей силы, но и на покрытіе омической потери напряженія въ якорѣ и добавочномъ сопротивленіи w. Такимъ образомъ, получаемъ:

$$e = E + i_a \cdot w + i_a \cdot w \cdot$$

Или

$$E = e - i_a \cdot w_a - i_a \cdot w.$$

Въ этомъ уравненіи e и w_a всегда постоянны, а i_a постоянно до тѣхъ поръ, пока нагрузка остается безъ измѣненія. Изъ всего сказаннаго мы видимъ, что измѣненіе добавочнаго сопротивленія оказываетъ сильное вліяніе на противоэлектродвижущую силу и на число оборотовъ.

Это станетъ еще яснѣе, если мы пренебрежемъ незначительною омическою потерею напряженія въ якорѣ и предположимъ, что напряженіе у щетокъ равно и прямо-противоположно электродвижущей силѣ. При этомъ условіи вольтметръ, присоединенный къ щеткамъ, измѣритъ непосредственно электродвижущую силу. Тогда при измѣненіи сопротивленія w находятъ, что число оборотовъ почти пропорціонально напряженію у щетокъ. Точность въ данномъ случаѣ будетъ тѣмъ больше, чѣмъ меньше омическая потеря напряженія въ якорѣ, слѣдовательно, наибольшею является тогда, когда все испытаніе будетъ сдѣлано при холостомъ ходѣ. Въ вышеприведенномъ примѣрѣ, при 110 вольтахъ напряженія у щетокъ при холостомъ ходѣ, согласно уравн. (43), стр. 263, число оборотовъ будетъ:

$$n = \frac{(110 - 0{,}3 \cdot 2) \cdot 60 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^6 \cdot 300} = 1\,094.$$

Включимъ теперь передъ якоремъ сопротивленіе въ 2,7 ома; тогда токъ при холостомъ ходѣ, равный 2 амперамъ, не измѣнится. Расходъ напряженія въ добавочномъ сопротивленіи будетъ $27{,}5 \cdot 2 = 55$ вольтъ, и напряженіе, которое мы измѣримъ вольтметромъ у щетокъ, будетъ $110 - 55 = 55$ вольтъ. Слѣдовательно, число оборотовъ равно:

$$n = \frac{(55 - 0{,}3 \cdot 2) \cdot 60 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^6 \cdot 300} = 544.$$

При напряженіи у щетокъ въ 55 вольтъ мы получаемъ почти половинное число оборотовъ по сравненію съ числомъ оборотовъ при 110 вольтахъ. Числа оборотовъ при холостомъ ходѣ почти пропорціональны напряженію у щетокъ. Приближенно этотъ законъ можно считать вѣрнымъ для различныхъ состояній работы. Такимъ образомъ, мы приходимъ къ интересному результату. При двигателѣ съ постояннымъ возбужденіемъ сила тока зависитъ исключительно отъ нагрузки, а число оборотовъ — отъ напряженія у щетокъ. Слѣдовательно, измѣняя напряженіе у щетокъ, можно произвольно регулировать число оборотовъ.

При этомъ слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что при указанномъ только что испытаніи добавочное сопротивленіе находилось только въ вѣтвяхъ якоря, такъ что возбужденіе электромагнитовъ оставалось постояннымъ во время всего испытанія. Если же, напротивъ, якорь и обмотка электромагнитовъ приключены обоими зажимами непосредственно другъ къ другу, и добавочное сопротивленіе включено въ общую цѣпь, то измѣненіе добавочнаго сопротивленія вызываетъ только незначительное измѣненіе числа оборотовъ. Увеличимъ, напримѣръ, напряженіе у зажимовъ якоря и электромагнитовъ вдвое, тогда магнитный потокъ при слабомъ насыщеніи магнитовъ возрастаетъ почти вдвое. Но тогда въ уравненіи:

$$n = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \,.\, N \cdot z}$$

въ числителѣ увеличится вдвое E, а въ знаменателѣ N и число оборотовъ останутся безъ перемѣны. Но если электромагниты будутъ почти что насыщены, то возрастаніе вдвое напряженія у зажимовъ увеличиваетъ приблизительно вдвое число оборотовъ, и двигатель работаетъ почти какъ двигатель при постоянномъ возбужденіи.

Далѣе слѣдуетъ уяснить себѣ тотъ фактъ, что измѣненіе числа оборотовъ посредствомъ добавочнаго сопротивленія возможно только въ томъ случаѣ, если будемъ пользоваться все время рычагомъ реостата, какъ это имѣетъ мѣсто, напримѣръ, у трамвайнаго двигателя съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ. Въ противномъ случаѣ измѣненіе числа оборотовъ при помощи добавочныхъ сопротивленій невозможно. Каждое измѣненіе нагрузки вызываетъ тотчасъ измѣненіе тока въ якорѣ, слѣдовательно, также паденіе напряженія въ добавочномъ сопротивленіи. За этимъ тотчасъ же значительно измѣнятся напряженіе у щетокъ и число оборотовъ. Нагрузимъ, напримѣръ, работающій въ-холостую двигатель, передъ якоремъ котораго включено добавочное сопротивленіе, тогда можетъ случиться, что число оборотовъ настолько уменьшится, что двигатель остановится.

65. Пускъ въ ходъ и регулированіе шунтового двигателя.

Шунтовой двигатель въ принципѣ представляетъ собою не что иное, какъ разсмотрѣнный въ предыдущей главѣ двигатель съ постояннымъ возбужденіемъ. Онъ, слѣдовательно, обладаетъ всѣми существенными свойствами послѣдняго, а именно: полною пропорціональностью между силою тока и нагрузкою и почти постояннымъ числомъ оборотовъ при холостой и полной назгрузкахъ. Это послѣднее свойство дѣлаетъ его особенно пригоднымъ для приведенія въ движеніе трансмиссій. Ссылаясь для выясненія работы шунтового двигателя на предыдущую статью, мы въ этой

статьѣ должны будемъ только указать самое существенное относительно пуска въ ходъ и регулированія шунтового двигателя.

Пусковой реостатъ имѣетъ цѣлью оградить якорь при пускѣ въ ходъ отъ чрезмѣрно сильнаго тока. Во время пуска въ ходъ двигатель находится еще въ покоѣ, и потому отсутствуетъ противоэлектродвижущая сила. Поэтому, если включить якорь съ его незначительнымъ сопротивленіемъ непосредственно, безъ добавочнаго сопротивленія, въ полное напряженіе сѣти, то сила тока будетъ чрезмѣрно велика. Вслѣдствіе этого необходимо включить пусковой реостатъ такихъ размѣровъ, чтобы сила тока не превосходила тѣхъ границъ, которыя устанавливаются для нея нагрѣваніемъ якоря. Къ тому же и изъ чисто механическихъ условій недопустимо, чтобы при пускѣ въ ходъ былъ очень великъ вращающій моментъ, въ особенности, когда приходится приводить въ движеніе тяжелыя массы. Наконецъ, необходимо принять еще во вниманіе то, что мгновенный чрезмѣрный расходъ тока вызываетъ большое паденіе напряженія въ проводахъ, а потому мерцаніе лампъ, ближайшихъ къ двигателю.

Когда же двигатель приводится во вращеніе помощью пускового реостата, то съ возрастаніемъ скорости увеличивается противоэлектродвижущая сила, и эта послѣдняя уже устанавливаетъ въ якорѣ токъ размѣровъ, соотвѣтствующихъ вращающему моменту. Послѣ этого начинаютъ пусковой реостатъ понемногу выключать.

Если при шунтовомъ двигателѣ требуется регулированіе числа оборотовъ, то послѣднее должно производиться измѣненіемъ сопротивленія обмотки электромагнитовъ. Наиболѣе просто это можно выяснить, примѣнивъ уравн. (43), на стр. 263, къ абсолютно холостому ходѣ. Тогда получимъ:

$$n = \frac{e \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot \boldsymbol{N} \cdot z}.$$

Если включить въ цѣпь возбужденія реостатъ и ѣтмъ самымъ ослабить токъ въ обмоткѣ электромагнита и силовой потокъ $\boldsymbol{N}$, то, согласно вышеуказанному уравненію, число оборотовъ увеличится. Это можетъ быть ясно также изъ того, что двигатель при слабомъ силовомъ потокѣ долженъ вращаться быстрѣе, чтобы возбудить противоэлектродвижущую силу, равную напряженію у зажимовъ. Однако это объясненіе только со стороны внѣшнихъ явленій. Внутренняя причина ускоренія якоря будетъ состоять въ томъ, что индуктируемая противоэлектродвижущая сила при прежнемъ числѣ оборотовъ съ ослабленіемъ магнитнаго потока будетъ меньше. Вслѣдствіе этого токъ въ якорѣ несоразмѣрно усилится настолько, что развиваемый двигателемъ вращающій моментъ превыситъ моментъ отъ нагрузки и тѣмъ самымъ создастъ условія для появленія ускоренія.

Но и послѣ наступленія равновѣсія токъ въ якорѣ останется по своимъ размѣрамъ больше, чѣмъ онъ былъ до ослабленія поля. Такъ какъ произведеніе пропорціонально нагрузкѣ $\boldsymbol{N} \cdot i_a$, то при ослабленіи магнитнаго поля долженъ одновременно возрастать необходимый для этой нагрузки токъ въ якорѣ. Для уясненія послѣдняго обратимся снова къ прежнему примѣру, въ которомъ напряженіе у зажимовъ было $e = 110$ вольтъ, сопротивленіе якоря $w_a = 0{,}3$ ома, число проволокъ $z = 300$ и магнитный потокъ $\boldsymbol{N} = 2 \cdot 10^6$ силовыхъ линій. Тогда для силы тока $i_a = 10$ амперъ при двухполюсномъ двигателѣ изъ уравненія (43), стр. 263, получаемъ:

$$n = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot \boldsymbol{N} \cdot z} = \frac{(110 - 10 \cdot 0{,}3) \cdot 60 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^6 \cdot 300} = 1\,070.$$

Если мы, не измѣняя нагрузку, ослабимъ силовое поле, напримѣръ, въ отношеніи 0,8 : 1, то токъ въ якорѣ увеличится въ отношеніи 1 : 0,8. Тогда получаемъ:

$$\boldsymbol{N} = 0{,}8 \cdot 2 \cdot 10^6 = 1{,}6 \cdot 10^6,$$

$$i_a = \frac{10}{0{,}8} = 12{,}5 \text{ ампера.}$$

Слѣдовательно, произведеніе $\boldsymbol{N} \cdot i_a$, осталось такимъ же, какъ и раньше, но сила тока въ якорѣ увеличилась. Мы должны были бы теперь ожидать, что число оборотовъ обратно пропорціонально измѣненному силовому потоку. Но на самомъ дѣлѣ, вслѣдствіе увеличенія тока въ якорѣ, возрастетъ омическое паденіе напряженія, и противоэлектродвижущая сила будетъ меньше прежней, что, понятно, не останется безъ вліянія на число оборотовъ. Мы ожидаемъ возрастанія числа оборотовъ примѣрно въ отношеніи 1 : 0,8, т. е. число оборотовъ должно быть $1\,070 \cdot \frac{1}{0{,}8} = 1\,338$. Въ дѣйствительности же число оборотовъ послѣ ослабленія поля будетъ:

$$n = \frac{(110 - 12{,}5 \cdot 0{,}3) \cdot 60 \cdot 10^8}{1{,}6 \cdot 10^6 \cdot 300} = 1\,328.$$

Отсюда же мы видимъ, что для повышенія числа оборотовъ нельзя силовой потокъ ослаблять безгранично. Дѣло въ томъ, что въ концѣ концовъ воздѣйствіе омической потери напряженія на число оборотовъ можетъ стать столь значительнымъ, что при чрезмѣрномъ ослабленіи поля число оборотовъ снова уменьшится. Послѣднее должно непремѣнно произойти, такъ

какъ иначе мы пришли бы къ такому выводу, что нагруженный (!) двигатель долженъ былъ бы вращаться съ безконечно большимъ числомъ оборотовъ, если посредствомъ магнитнаго размыканія тока въ электромагнитахъ ослабить магнитное поле до нуля. Въ дѣйствительности же двигатель въ этомъ случаѣ остановится, такъ какъ одинъ изъ обоихъ множителей, которые входятъ въ выраженіе для вращающаго момента, дѣлается равнымъ нулю. Слѣдовательно, необходимо придать N или i_a такіе размѣры, при которыхъ число оборотовъ при заданной нагрузкѣ будетъ наибольшимъ. Для нахожденія вышеуказаннаго значенія для i_a, согласно стр. 264, приравняемъ механическую мощность электрической:

$$E\cdot i_a = e\cdot i_a - i_a{}^2\cdot w_a = M_d\cdot 2\pi\cdot\frac{n}{60}\cdot 9{,}81.$$

Такъ какъ нагрузка при нашемъ испытаніи должна оставаться безъ измѣненія, то M_d постоянно. Вводя тогда коэффиціентъ пропорціональности $c = \dfrac{60}{2\pi\cdot 9{,}81\cdot M_d}$, получаемъ:

$$n = c\cdot(e\cdot i_a - i_a{}^2\cdot w_a).$$

Дифференцируя данное выраженіе по i_a и приравнивая первую производную нулю, имѣемъ:

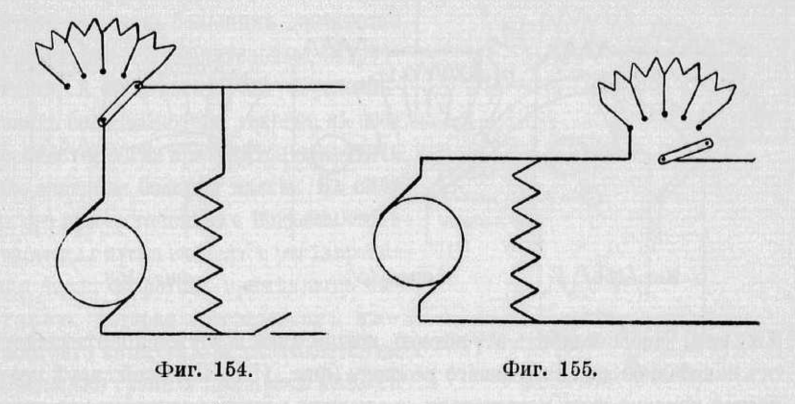
$$i_a\cdot w_a = \frac{e}{2}.$$

Т. е. число оборотовъ для данной нагрузки достигаетъ своего наибольшаго значенія тогда, когда магнитный потокъ будетъ ослабленъ до того, что омическая потеря напряженія станетъ равна половинѣ напряженія у зажимовъ. Электрическій коэффиціентъ полезнаго дѣйствія якоря въ этомъ случаѣ будетъ равенъ 0,5, и данное состояніе работы будетъ находиться, особенно вслѣдствіе очень большого значенія i_a, далеко внѣ предѣловъ работы.

Перейдемъ теперь къ устройству пускового реостата, включеннаго въ цѣпь якоря, и регулирующаго реостата, включеннаго въ цѣпь возбужденія. Мгновенный разрывъ тока при остановкѣ двигателя можетъ привести, вслѣдствіе самоиндукціи, если не къ пробиванію изоляціи, то во всякомъ случаѣ къ образованію искры въ мѣстѣ разрыва. Поэтому необходимо заботиться о томъ, чтобы токъ въ электромагнитахъ ослаблялся постепенно до нуля. Это достигается тѣмъ, что при выключеніи размыкается сперва главная цѣпь двигателя, на фиг. 154, напримѣръ, при помощи выключателя. Тогда якорь вначалѣ продолжаетъ вращаться по инерціи въ томъ же на-

правленіи и въ немъ будетъ, вслѣдствіе постепеннаго исчезновенія магнитнаго поля, еще индуктироваться электродвижущая сила. Такъ какъ послѣдняя одного направленія съ противоэлектродвижущей силой, существовавшей во время работы, то она заставитъ сквозь обмотку электромагнитовъ пройти токъ, который будетъ одного направленія съ прежнимъ токомъ въ обмоткѣ электромагнитовъ. Вслѣдствіе постепеннаго замедленія вращенія двигателя станетъ уменьшаться токъ въ электромагнитахъ, а отсюда и магнитный потокъ, которые постепенно дойдутъ до нуля. Это можно наблюдать на постепенномъ паденіи показаній вольтметра, приключеннаго къ зажимамъ двигателя.

Но подобное размыканіе главнаго тока очень опасно, такъ какъ рычагъ пускового реостата останется въ такомъ положеніи, при которомъ во



Фиг. 154. Фиг. 155.

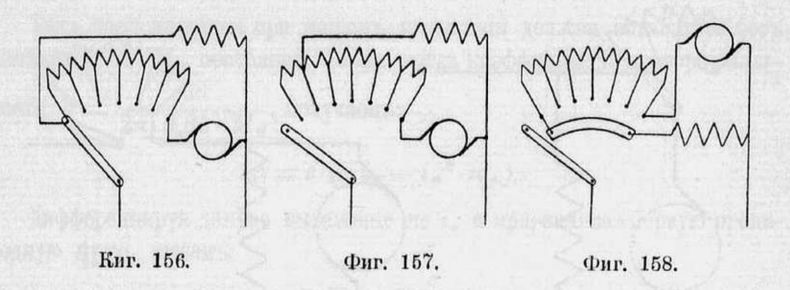
время обратнаго включенія главнаго тока произойдетъ опасное короткое замыканіе. Выходъ изъ такого положенія, представленный на фиг. 155: непосредственное соединеніе якоря и электромагнитовъ и включеніе въ общую цѣпь пускового реостата и выключателя, является неудобопримѣнимымъ,—такъ какъ во время пуска въ ходъ якорь находится въ покоѣ,—напряженіе у щетокъ, слѣдовательно, выразится только произведеніемъ $i_a\cdot w_a$, а потому будетъ чрезвычайно мало. Поэтому токъ въ электромагнитахъ и магнитный потокъ будутъ почти равны нулю и двигатель не пойдетъ въ ходъ.

Но, соединяя пусковой реостатъ и якорь послѣдовательно и включая обмотку электромагнитовъ между свободнымъ концомъ якоря и свободнымъ концомъ пускового реостата (фиг. 156)[1], получаютъ необходимую схему

[1] См. статью R. Krause ETZ. 1901, стр. 233.

соединенія. При среднемъ положеніи рычага правая часть сопротивленія представитъ собою пусковой реостатъ, а лѣвая часть сопротивленія будетъ включена въ цѣпь возбужденія. Происходящее отъ этого небольшое ослабленіе возбуждающаго тока несущественно, такъ какъ сопротивленіе всего пускового реостата вообще будетъ значительно меньше сопротивленія всей обмотки электромагнитовъ. Эта схема соединенія имѣетъ большое преимущество, состоящее въ томъ, что якорь и магниты находятся въ постоянномъ соединеніи другъ съ другомъ. Выключеніе поэтому,—въ особенности, если его производятъ быстро и на полномъ ходу двигателя,—происходитъ безъ искренія.

На фиг. 156 пусковой реостатъ при полной нагрузкѣ включенъ постоянно въ цѣпь возбужденія и потому нѣсколько повышаетъ потери на тепло



Фиг. 156. Фиг. 157. Фиг. 158.

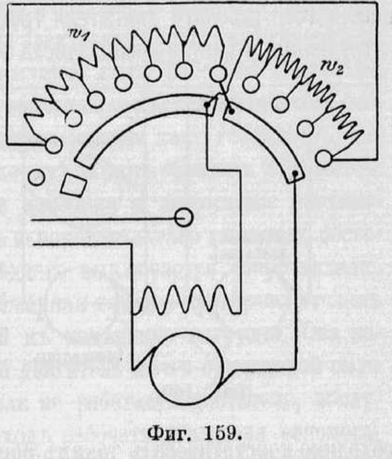
Джоуля. Чтобы ослабить эту потерю, можно цѣпь возбужденія отвѣтвлять отъ какой-либо части пускового реостата (фиг. 157). При этой схемѣ получается, конечно, тотъ недостатокъ, что токъ въ электромагнитахъ при включеніи не сразу достигаетъ своей полной силы. Вращающій моментъ возрастаетъ только постепенно и тѣмъ медленнѣе, чѣмъ болѣе самоиндукція катушекъ электромагнитовъ замедляетъ образованіе магнитнаго потока.

На фиг. 158 этотъ недостатокъ, равно какъ и добавочная потеря, устраняются примѣненіемъ двойного рычага. Обмотка электромагнитовъ включается сразу полностью при помощи короткаго рычага, тогда какъ токъ въ якорѣ при помощи болѣе длиннаго рычага и пускового реостата. Выключеніе происходитъ съ нѣсколько большимъ искреніемъ, чѣмъ на фиг. 156, такъ какъ въ моментъ выключенія токъ въ электромагнитахъ, создаваемый якоремъ, долженъ еще пройти пусковой реостатъ, и потому немного ослабѣваетъ.

Но это еще болѣе ярко выступаетъ въ случаѣ фиг. 159. Сначала включаются электромагниты при помощи короткаго рычага и лѣваго сегмента, въ то время, какъ токъ въ якорѣ замыкается при помощи длин-

наго рычага и пускового реостата w_1. Рычаги на фигурѣ не изображены. При полной работѣ двойной рычагъ находится на правомъ концѣ лѣваго сегмента. Если желаютъ число оборотовъ еще повысить, то перемѣщаютъ рычагъ вправо. При этомъ реостатъ w_2 станетъ постепенно включаться въ цѣпь возбужденія, въ то время какъ токъ въ якорѣ будетъ замыкаться непосредственно черезъ короткій рычагъ и правый сегментъ.

Для выключенія безъ искренія лѣвый конецъ пускового реостата соединенъ съ правымъ концомъ регулировочнаго реостата. Послѣ выключенія продолжающій вращаться двигатель работаетъ, какъ генераторъ, и посылаетъ поэтому токъ послѣдовательно черезъ якорь, электромагниты, регулировочный реостатъ w_2 и пусковой реостатъ w_1.



Фиг. 159.

Конструированіе пускового реостата для очень большихъ двигателей представляетъ значительныя затрудненія, и примѣненіе его обусловливаетъ большія потери энергіи, въ особенности, когда приходится приводить въ движеніе большія массы. Въ силу этого при установкахъ подъемниковъ часто для пуска въ ходъ и регулированія числа оборотовъ примѣняютъ батарею, которая посредствомъ элементнаго коммутатора раздѣляется на нѣсколько группъ. При пускѣ въ ходъ только небольшая часть батареи приключается **непосредственно** къ якорю. Когда же съ увеличеніемъ числа оборотовъ возростаетъ противоэлектродвижущая сила двигателя, то напряженіе у зажимовъ якоря увеличиваютъ постепеннымъ включеніемъ элементовъ. Батарея тогда одновременно служитъ и въ качествѣ буфферной батареи.

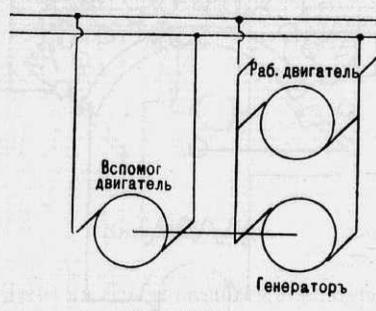
Для пуска въ ходъ и для регулированія числа оборотовъ двигателя употребляютъ также особый **пусковой аггрегатъ**[1]). Такъ, напримѣръ, въ схемѣ **Леонарда** (фиг. 160) изъ сѣти питается вспомогательный двигатель, который заклиненъ на одномъ валу съ генераторомъ съ независимымъ возбужденіемъ и **постоянно** находится въ работѣ. Для пуска въ ходъ рабочаго двигателя генераторъ, вращающійся при полномъ числѣ оборотовъ, слабо возбуждается и включается непосредственно на рабочій двигатель. Увели-

---

[1]) См. **Köttgen**, ETZ. 1902, стр. 601, и **Meyersberg**, ETZ. 1903, стр. 260.

чивая постепенно возбужденіе генератора, доводятъ рабочій двигатель до полнаго числа оборотовъ, затѣмъ, послѣ того какъ онъ проработаетъ такъ нѣкоторое время въ-холостую, приключаютъ его непосредственно къ сѣти. Подобнаго рода переключеніе, понятно, возможно только тогда, когда центральная станція доставляетъ постоянный, а не трехфазный токъ.

Установка такого агрегата для преобразованія, состоящаго изъ вспомогательнаго двигателя и пусковой динамомашины, на первый взглядъ можетъ показаться нераціональной. Но здѣсь необходимо принять во вниманіе, что при большихъ силовыхъ установкахъ обыкновенно въ распоряженіи имѣется только трехфазный токъ, и преобразованіе этого послѣдняго въ постоянный все равно является необходимымъ, такъ какъ конструированіе медленно вращающагося рабочаго двигателя трехфазнаго тока представляетъ большія затрудненія, а регулированія числа оборотовъ вообще трудно достичь.



Фиг. 160.

Особенно раціональной является установка по системѣ Ильгнера тяжелаго маховика между вспомогательнымъ двигателемъ и генераторомъ. Послѣдній при сильной нагрузкѣ отдаетъ часть накопленной имъ энергіи, тогда какъ при болѣе слабой нагрузкѣ въ немъ накопляется энергія въ видѣ пріобрѣтаемаго имъ ускоренія. Вспомогательный двигатель при этомъ необходимо конструировать такимъ образомъ, чтобы при нагрузкѣ двигатель значительно сбавлялъ обороты, дабы маховикъ могъ проявлять свое дѣйствіе. Этого не трудно достичь посредствомъ большого сопротивленія якоря вспомогательнаго двигателя. Если сопротивленіе якоря будетъ равнымъ нулю, то двигатель практически будетъ работать съ постояннымъ числомъ оборотовъ, т. е. маховикъ совершенно не будетъ оказывать никакого дѣйствія, и всѣ колебанія нагрузки будутъ имѣть послѣдствіемъ только сильныя измѣненія въ потребленіи тока двигателемъ.

Замедленія преобразовательнаго агрегата при увеличеніи нагрузки можно достичь также устройствомъ компаундъ-обмотки у вспомогательнаго двигателя, которая проходится токомъ двигателя такимъ образомъ, что усиливаетъ дѣйствіе шунтовой обмотки. Тогда при болѣе сильной нагрузкѣ сила тока, несмотря на пониженіе числа оборотовъ, не будетъ сильно измѣняться, такъ какъ противоэлектродвижущая сила вслѣдствіе усиленія магнитнаго потока будетъ оставаться постоянною.

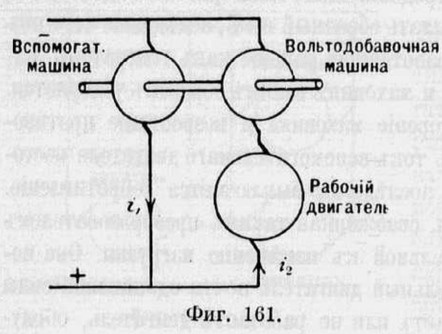
Но этотъ преобразователь Ильгнера работаетъ еще совершеннѣй, когда при пускѣ въ ходъ рабочаго двигателя въ цѣпь якоря вспомогательнаго двигателя автоматически включается сопротивленіе. Процессъ тогда состоитъ въ томъ, что повышенная мощность рабочаго двигателя увеличиваетъ электрическую мощность генератора преобразователя. Увеличившійся расходъ тока вспомогательный двигатель стремится заимствовать отъ сѣти. Если мы этому воспрепятствуемъ тѣмъ, что будемъ автоматически удерживать токъ его постояннымъ, то число оборотовъ преобразующаго аггрегата и маховика уменьшится; маховикъ тогда отдаетъ добавочную мощность, въ то время какъ мощность, сообщаемая изъ сѣти вспомогательному двигателю, въ виду постоянства тока, остается безъ измѣненія. Обратное явленіе происходитъ при торможеніи и остановкѣ рабочаго двигателя. Для этого путемъ ослабленія возбужденія электродвижущая сила генератора становится меньше противоэлектродвижущей силы рабочаго двигателя; рабочій двигатель начинаетъ посылать обратный токъ, вслѣдствіе чего онъ самъ затормаживается, машина, работавшая раньше какъ генераторъ, начинаетъ работать какъ двигатель, и маховикъ такимъ образомъ ускоряется. Для того чтобы, несмотря на ускореніе маховика и возростаніе противоэлектродвижущей силы, удержать токъ вспомогательнаго двигателя постояннымъ, изъ цѣпи якоря этого послѣдняго выключается сопротивленіе. Такимъ образомъ силовая станція, снабженная такимъ преобразователемъ Ильгнера, остается нечувствительной къ измѣненію нагрузки. Она постоянно посылаетъ въ вспомогательный двигатель почти одинаковой силы токъ независимо отъ того, работаетъ или не работаетъ двигатель, обслуживающій подъемники. При пускѣ въ ходъ рабочаго двигателя вспомогательный двигатель и маховикъ работаютъ сообща на генераторъ; при торможеніи вспомогательной двигатель и генераторъ, работающій теперь какъ двигатель, дѣйствуютъ сообща на маховикъ. Напримѣръ, у подъемной установки на заводѣ Сименсъ—Шукертъ, токъ у двигателя, обслуживающаго подъемники, колебался отъ $+2\,000$ амперъ при пускѣ въ ходъ до $-2\,000$ амперъ при торможеніи рабочаго двигателя. Токъ въ сѣти, питающей вспомогательный двигатель, съ небольшими колебаніями держался около 400 амперъ, при этомъ число оборотовъ маховика колебалось отъ 12% до 15%.

Главнымъ преимуществомъ пуска въ ходъ при помощи пусковой машины состоитъ въ томъ, что опредѣленному положенію рычага контроллера во всѣхъ случаяхъ соотвѣтствуетъ опредѣленная скорость двигателя, обслуживающаго подъемники, независимо отъ нагрузки этого двигателя. При пускѣ въ ходъ при помощи включенія простого добавочнаго сопротивленія

этого нельзя было бы достичь, такъ какъ омическое паденіе напряженія въ добавочномъ сопротивленіи измѣнялось бы съ силою тока, т. е. съ нагрузкою.

Вмѣсто измѣненія сопротивленія въ цѣпи якоря, можно токъ двигателя преобразователя удерживать постояннымъ при помощи измѣненія возбужденія. Напримѣръ, при увеличеніи нагрузки рабочаго двигателя можно усиливать магнитный потокъ двигателя преобразователя, чтобы удерживать противоэлектродвижущую силу, несмотря на паденіе числа оборотовъ, постоянной. Тогда, согласно уравненію $i_a = \frac{e - E}{w_a}$, остается постоянной и сила тока.

Далѣе интересъ представляетъ также пускъ въ ходъ большихъ двигателей при помощи машины, электродвижущая сила которой сначала направлена противъ напряженія въ сѣти, а затѣмъ становится съ нимъ одного направленія. На фиг. 161 большая машина представляетъ собою двигатель, построенный на 1 000 вольтъ. Добавочный аггрегатъ машинъ состоитъ изъ двухъ заклиненныхъ на одномъ валу машинъ, расчитанныхъ каждая на 500 вольтъ и работающихъ все время приблизительно съ постояннымъ числомъ оборотовъ. Напряженіе въ сѣти 500 вольтъ.



Фиг. 161.

Передъ пускомъ въ ходъ рабочій двигатель находится въ покоѣ и служитъ только проводникомъ для вольтодобавочной машины. Послѣдняя приводитъ въ движеніе, какъ двигатель, вспомогательную машину, но работаетъ при этомъ только въ-холостую, такъ какъ электродвижущая сила вспомогательной машины посредствомъ соотвѣтствующаго возбужденія дѣлается равною напряженію въ сѣти и направлена противоположно этому послѣднему.

Ослабляя возбужденіе вольтодобавочной машины, работающей въ качествѣ двигателя, мы немного ускоримъ ее. Вслѣдствіе увеличившагося числа оборотовъ электродвижущая сила вспомогательной машины превыситъ напряженіе въ сѣти и дастъ токъ i_1. Благодаря этому увеличится мощность двигателя и въ то же время усилится токъ i_2. Слѣдовательно, въ дѣйствительности токъ i_1 пойдетъ изъ вспомогательной машины непосредственно въ вольтодобавочную.

Наконецъ, токъ i_2 становится столь большимъ, что приведетъ въ движеніе рабочій двигатель. Тогда въ правой вѣтви мы имѣемъ два послѣдовательно включенныхъ двигателя. При такомъ послѣдовательномъ включеніи вообще нельзя сказать, какимъ образомъ распредѣлится на оба двигателя напряженіе въ сѣти. Но въ данномъ особомъ случаѣ число оборотовъ вольтодобавочной машины практически постоянно, такъ какъ электродвижущая сила вспомогательной машины съ независимымъ возбужденіемъ, заклиненной съ нею на одномъ валу, при пренебреженіи омической потери напряженія, равна напряженію сѣти, что можетъ быть только при почти постоянномъ числѣ оборотовъ. Тотъ фактъ, что эта вспомогательная машина приключена непосредственно къ сѣти, можетъ послужить исходнымъ пунктомъ для пониманія всего процесса. Отсюда же вытекаетъ ея почти постоянное число оборотовъ, т. е. почти постоянное также число оборотовъ вольтодобавочной машины, работающей какъ двигатель, несмотря на все увеличивающееся ослабленіе ея возбужденія.

Вольтодобавочная машина создаетъ тогда, при ея почти постоянномъ числѣ оборотовъ, почти опредѣленную электродвижущую силу, которая соотвѣтствуетъ ея возбужденію, и на преодолѣніе которой затрачивается часть напряженія у зажимовъ. Остальная часть напряженія распредѣляется на рабочій двигатель, который принимаетъ тогда вполнѣ опредѣленное число оборотовъ.

Въ то же время сила тока i_2 удерживается въ равновѣсіи нагрузкою рабочаго двигателя и, слѣдовательно, при дальнѣйшемъ ослабленіи магнитнаго потока вольтодобавочной машины не возростаетъ. Вслѣдствіе этого вращающій моментъ вольтодобавочной машины при ослабленіи ея магнитнаго потока будетъ постоянно уменьшаться, т. е. машина, противоположно выводамъ на стр. 272, при ослабленіи магнитнаго потока будетъ замедляться. Если это замедленіе даже будетъ ничтожно, то все же оно будетъ достаточно для того, чтобы токъ, создаваемый вспомогательной машиной, довести до нуля. Наконецъ, магнитный потокъ вольтодобавочной машины, а отсюда ея электродвижущая сила и вращающій моментъ станутъ равными нулю. Тогда она будетъ приводиться въ движеніе въ-холостую вспомогательной машиной, работающей теперь какъ двигатель, и все напряженіе сѣти въ 500 вольтъ перейдетъ на рабочій двигатель.

Теперь станемъ постепенно возбуждать въ обратномъ направленіи вольтодобавочную машину, приводимую въ движеніе вспомогательной машиной; тогда ея электродвижущая сила станетъ одного направленія съ токомъ i_2. Она станетъ работать, какъ генераторъ, напряженіе котораго

будетъ прибавляться къ напряженію сѣти. Вслѣдствіе этого напряженіе у зажимовъ двигателя постепенно возростаетъ до 1 000 вольтъ, когда онъ и приметъ полное число оборотовъ. Его мощность при этомъ на половину будетъ доставляться непосредственно сѣтью, а наполовину вольтодобавочной машиной, но полностью, понятно изъ сѣти.

66. Двигатель съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

Явленія у двигателя съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ гораздо сложнѣе, чѣмъ у шунтового потому, что магнитное поле двигателя съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ мѣняется при различныхъ состояніяхъ работы. Якорь и обмотка электромагнитовъ включены послѣдовательно другъ съ другомъ, и токъ въ якорѣ, который совокупно съ магнитнымъ потокомъ создаетъ вращающій моментъ, одновременно является и намагничивающимъ токомъ. Если, напримѣръ, нагрузить двигатель съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ сильнѣе, то тогда возрастетъ токъ, какъ въ якорѣ, такъ и въ обмоткѣ электромагнитовъ. Возрастаніе вращающаго момента происходитъ тогда согласно уравн. (42) на стр. 261 благодаря увеличенію обоихъ множителей $\boldsymbol{N}$ и i_a.

Если двигатель работаетъ въ нижней части намагничивающей кривой, стало быть при ненасыщенномъ желѣзѣ, то вдвое большему току соотвѣтствуетъ и вдвое большій магнитный потокъ, слѣдовательно, согласно вышеприведенному уравненію, въ четыре раза большій вращающій моментъ. Или, наоборотъ: если нагрузка увеличивается въ четыре раза, то сила тока возрастаетъ только вдвое.

Что касается числа оборотовъ двигателя съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, то оно опредѣляется на основаніи уравненія (43), стр. 263.

$$n = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot \boldsymbol{N} \cdot z}.$$

При этомъ, ради упрощенія, подъ w_a будемъ подразумѣвать полное сопротивленіе якоря и электромагнитовъ. При увеличеніи нагрузки, стало быть и тока, числитель въ вышеуказанномъ уравненіи остается сравнительно безъ измѣненія, такъ какъ полное сопротивленіе обмотки якоря и электромагнитовъ всегда очень мало. Наоборотъ, знаменатель, а потому и число оборотовъ въ этомъ случаѣ значительно измѣняются, такъ какъ вмѣстѣ съ токомъ въ якорѣ измѣняется также и магнитный потокъ. При

повышенномъ магнитномъ потокѣ достаточнымъ является менѣе значительное число оборотовъ для того, чтобы противоэлектродвижущая сила почти сравнялась съ напряженіемъ у зажимовъ.

Большой вращающій моментъ этого двигателя при сравнительно слабомъ токѣ и измѣненіе числа оборотовъ дѣлаютъ этотъ двигатель особенно пригоднымъ для работы при подъемникахъ и трамваяхъ. При троганіи съ мѣста вращающій моментъ, развиваемый двигателемъ, изъ-за ускоренія массъ, долженъ быть больше вращающаго момента, вызываемаго нагрузкою. И особенно цѣннымъ свойствомъ этого двигателя является то, что этотъ значительный вращающій моментъ получается при сравнительно слабомъ токѣ.

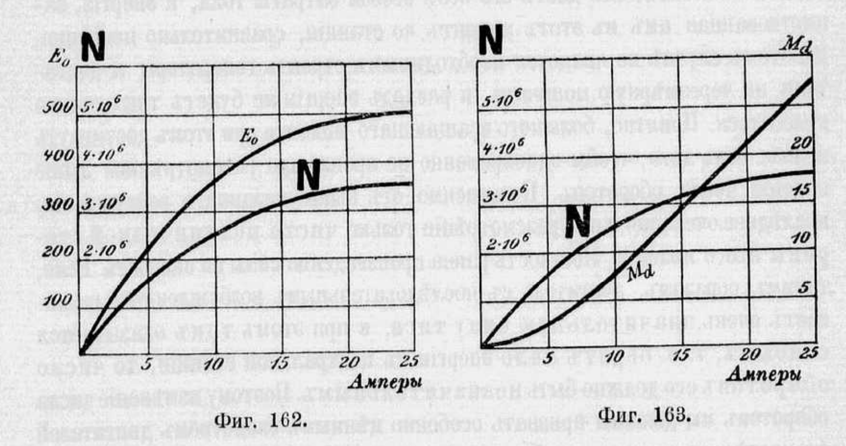
Этотъ же двигатель является прекрасно приспособленнымъ для той разнообразной нагрузки, которая получается у трамваевъ вслѣдствіе бо́льшаго или меньшаго подъема пути. Когда отъ него требуется большой вращающій моментъ, онъ даетъ его безъ особой затраты тока, и энергія, заимствованная имъ въ этотъ моментъ со станціи, сравнительно невелика. Въ этомъ случаѣ не является необходимымъ строить генераторы и двигатели на чрезмѣрную мощность, и расходъ энергіи не будетъ такъ сильно колебаться. Понятно, большого вращающаго момента при этомъ достигнуть нельзя безъ того, чтобы одновременно не произошло разсмотрѣнное выше паденіе числа оборотовъ. Независимо отъ вышеуказаннаго разсужденія, послѣднее очевидно и при разсмотрѣніи только чисто механической стороны этого явленія. Мощность равна произведенію силы на скорость. Если, такимъ образомъ, двигатель съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ развиваетъ очень значительную силу тяги, и при этомъ токъ оказывается слабымъ, т. е. беретъ мало энергіи съ центральной станціи, то число оборотовъ его должно быть незначительнымъ. Поэтому измѣненіе числа оборотовъ мы должны признать особенно цѣннымъ свойствомъ двигателей съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, и для равномѣрной работы силовой станціи очень важно, чтобы, напримѣръ, переполненный вагонъ трамвая медленно взошелъ на гору.

Опредѣлимъ теперь путемъ расчета работу двигателя съ последовательнымъ возбужденіемъ при различныхъ состояніяхъ работы его. Для этой цѣли построимъ сначала кривую намагничиванія, приводя въ движеніе двигатель, какъ генераторъ, при помощи другого двигателя съ опредѣленнымъ числомъ оборотовъ n_0 и нагружая его электрическими сопротивленіями. При этомъ измѣримъ токъ i_a, доставляемый нашимъ генераторомъ, и напряженіе у зажимовъ e_0. Тогда электродви-

жущую силу E_o двигателя съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ мы опредѣлимъ по уравненію:

$$E_o = e_o + i_a \cdot w_a,$$

гдѣ w_a обозначаетъ опять полное внутреннее сопротивленіе. Нанесемъ затѣмъ, какъ мы дѣлали уже это въ статьѣ 58, электродвижущую силу по оси ординатъ, а токъ во внѣшней цѣпи, который одновременно является токомъ въ обмоткѣ якоря и электромагнитахъ, по оси абсциссъ. Полученная такимъ образомъ кривая будетъ характеристикою машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ. Дѣля затѣмъ электродвижущія силы E_o на постоянную величину $\frac{p \cdot n_o \cdot z \cdot 10^{-8}}{a \cdot 60}$, получимъ магнитный потокъ N, создаваемый произвольнымъ намагничивающимъ токомъ i_a. Кривая N отличается отъ кривой E_o только масштабомъ (фиг. 162) и пригодна, въ



Фиг. 162. Фиг. 163.

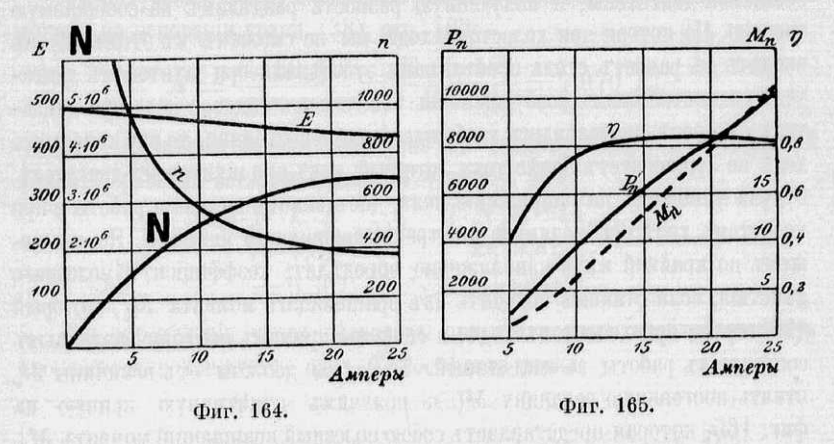
противоположность кривой E_o, не только для генератора, но и для двигателя.

Если подобное измѣреніе невозможно, то можно заставить машину при постоянномъ напряженіи у зажимовъ работать также какъ двигатель и нагружать ее механически. Затѣмъ измѣримъ число оборотовъ n и силу тока двигателя и опредѣлимъ имѣющійся тогда магнитный потокъ согласно уравненію (43) стр. 263.

$$N = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot z \cdot n}.$$

Опредѣливъ этимъ или какимъ-либо другимъ способомъ магнитный потокъ для каждой силы тока i_a, составимъ затѣмъ произведенія изъ двухъ соотвѣтствующихъ другъ другу значеній N и i_a и нанесемъ ихъ по оси ординатъ. Такимъ образомъ получаемъ кривую M_d (фиг. 163), ординаты которой, принимая во вниманіе масштабъ кривой, дадутъ намъ вращающій моментъ для каждой отдѣльной абсциссы. Въ началѣ кривая M_d выпукла въ сторону оси абсциссъ, т. е. вращающій моментъ возрастаетъ скорѣе, чѣмъ сила тока. Но затѣмъ, когда желѣзо насыщается, кривая M_d становится прямою и приращеніе вращающаго момента пропорціонально приращенію силы тока.

Кривая магнитнаго потока N даетъ намъ въ то же время возможность опредѣлить для каждаго отдѣльнаго состоянія работы соотвѣтствующее



Фиг. 164. Фиг. 165.

число оборотовъ. Для этой цѣли на разстояніи e отъ оси абсциссъ проводимъ (фиг. 164) горизонтальную прямую (на фиг. 164 это разстояніе равно 500 вольтамъ) и черезъ точку пересѣченія горизонтали съ осью ординатъ проводимъ прямую, образующую съ горизонталью уголъ α. Послѣдній опредѣляется уравненіемъ:

$$tg\alpha = w_a.$$

При этомъ, понятно, ординаты измѣряются масштабомъ вольтъ, а абсциссы масштабомъ амперъ. Разность между ординатами горизонтали и наклонной прямой для любого состоянія работы равна $i_a \cdot tg\alpha = i_a \cdot w_a$, т. е. равна омической потерѣ напряженія. Ординаты наклонной кривой, представляютъ, слѣдовательно, противоэлектродвижущую силу E. Если раздѣлимъ ее на соотвѣтствующій магнитный потокъ, то, согласно уравн. (38)

стр. 162, мы получимъ соотвѣтствующее число оборотовъ n. Подобнымъ образомъ построена кривая n на фиг. 164.

Эта кривая указываетъ, что двигатель съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ при холостомъ ходѣ понесетъ. Его число оборотовъ возрастетъ настолько, что двигатель можетъ разлетѣться на части. Противъ этой опасности мы должны защитить двигатель автоматическимъ выключателемъ. Съ увеличеніемъ нагрузки сначала число оборотовъ значительно будетъ падать до тѣхъ поръ, пока оно, при наступившемъ сильномъ насыщеніи желѣза, въ предѣлахъ нормальной работы не дойдетъ почти до постояннаго значенія.

Полный коэффиціентъ полезнаго дѣйствія мы получимъ, если вычтемъ потери на тепло Джоуля и механическое треніе изъ энергіи, сообщаемой двигателю, и полученную разность раздѣлимъ на сообщаемую энергію. Но потери при холостомъ ходѣ мы не сможемъ въ этомъ случаѣ вводить въ расчетъ столь просто, какъ это дѣлали при шунтовомъ двигателѣ съ постояннымъ возбужденіемъ. Такъ какъ силовое поле при двигателѣ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ непостоянно, то при холостомъ ходѣ не существуетъ болѣе тока, который, какъ при шунтовомъ двигателѣ, будучи умноженъ на напряженіе поля, доставляетъ во время работы и при холостомъ ходѣ необходимый для тренія вращающій моментъ. Но мы можемъ по крайней мѣрѣ приближенно опредѣлить коэффиціентъ полезнаго дѣйствія, если станемъ исходить изъ вращающаго момента M_o, который дѣйствуетъ при холостомъ ходѣ, и если мы примемъ его при различныхъ состояніяхъ работы за постоянный. Тогда мы должны отъ величины M_d отнять постоянную величину M_o и получимъ пунктирную кривую на фиг. 165, которая представляетъ собою полезный вращающій моментъ M_n.

Умноживъ полезный вращающій моментъ на число оборотовъ, мы получаемъ, независимо отъ масштаба, полезную мощность P_n. Для полученія коэффиціента полезнаго дѣйствія необходимо полезную мощность раздѣлить на сообщаемую мощность $e \cdot i_a$. Этимъ способомъ мы получимъ кривую η, ординаты которой дадутъ намъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія. Какъ мы видимъ, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія при болѣе слабой нагрузкѣ менѣе значителенъ вслѣдствіе работы при холостомъ ходѣ. При увеличеніи нагрузки онъ возрастаетъ и доходитъ до своего максимума, и затѣмъ начинаетъ опять падать, когда при возрастаніи тока въ якорѣ потери на тепло Джоуля становятся очень значительными.

67. Примѣръ.

Опредѣлимъ, теперь, число оборотовъ, силу тяги и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія двигателя съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ въ примѣрѣ, данныя котораго взяты изъ курса «Электромеханическія конструкціи» Каппа. У четырехполюснаго трамвайнаго двигателя фирмы Эрликонъ, съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, съ напряженіемъ у зажимовъ въ 500 вольтъ, внутреннее сопротивленіе $w_a = 2{,}75$ ома и число проволокъ на якорѣ $z = 944$. Характеристика машины, какъ генератора съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ при числѣ оборотовъ $n_o = 450$, выражается двумя первыми вертикальными рядами нижеприведенныхъ таблицъ.

Мы получаемъ тогда магнитные потоки, порождаемые данными здѣсь токами на основаніи уравн. (38), стр. 162:

$$N = \frac{E_o \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot n_o \cdot z} = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{2 \cdot 450 \cdot 944} = 7\,070\ E_o.$$

Эти магнитные потоки совокупно съ токами создадутъ вращающій моментъ, равный, согласно уравн. (42) на стр. 261:

$$M_d = \frac{p \cdot N \cdot i_a \cdot z}{a \cdot 2\pi \cdot 9{,}81} \cdot 10^{-8} = \frac{2 \cdot N \cdot i_a \cdot 944}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot 10^{-8} =$$
$$= 0{,}307 \cdot 10^{-6} \cdot N \cdot i_a \text{ клг-мтр.}$$

Для опредѣленія числа оборотовъ двигателя намъ необходимо знать противоэлектродвижущую силу E. Послѣдняя равна:

$$E = e - i_a \cdot w_a = 500 - 2{,}75 \cdot i_a.$$

Тогда число оборотовъ мы получаемъ изъ уравн. (38), стр. 162:

$$n = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot N \cdot z} = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{2 \cdot N \cdot 944} = 3{,}18 \cdot 10^6 \cdot \frac{E}{N}.$$

Результаты этого расчета сопоставлены наглядно въ нижеслѣдующей таблицѣ и по даннымъ этой таблицы вычерчены кривыя предыдущей статьи:

Генераторъ.		Двигатель и генераторъ.	
i_a	E_o	$N = 7070 \cdot E_o$	$M_d = 0{,}307 \cdot 10^{-6} \cdot N \cdot i_a$
5	225	$1{,}59 \cdot 10^6$	2,45
10	362	$2{,}56 \cdot 10^6$	7,85
15	450	$3{,}18 \cdot 10^6$	14,6
20	490	$3{,}46 \cdot 10^6$	21,3
25	505	$3{,}56 \cdot 10^6$	27,3

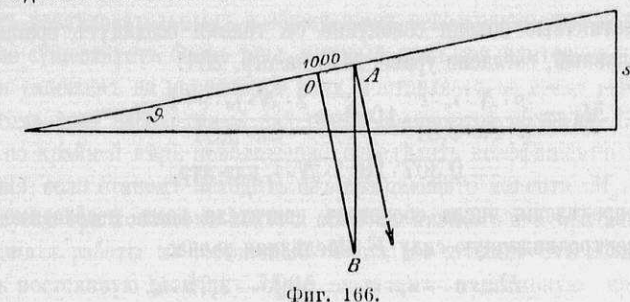
i_a	Двигатель. $E = 500 - 2{,}75 \cdot i_a$	$n = 3{,}18 \cdot 10^6 \cdot \frac{E}{N}$
5	486,2	970
10	472,5	590
15	458,7	460
20	445	410
25	431,2	390

Эти значенія даютъ возможность для каждаго подъема при заданномъ вѣсѣ вагона опредѣлить соотвѣтствующій токъ и соотвѣтствующую скорость вагона. Пусть

G вѣсъ вагона въ тоннахъ (1 тонна = 1.000 клг*),

f коэффиціентъ тяги, т. е. сила въ килограммахъ, которая необходима для сдвига по плоской горизонтальной поверхности одной тонны,

s подъемъ въ тысячныхъ.



Фиг. 166.

Тогда сила тяги, необходимая на плоской горизонтальной поверхности, будетъ равна $G \cdot f$. Съ другой стороны, при подъемахъ слагающая силы тяжести, которая какъ разъ направлена прямо противоположно направленію движенія, согласно фиг. 166, будетъ равна:

$$AO = AB \cdot \sin\vartheta.$$

Подставимъ вмѣсто $\sin\vartheta$ выраженіе $s/1000$ и вмѣсто AB вѣсъ вагона въ клг, т. е. 1 000 G, тогда получимъ:

$$AO = 1000\ G \cdot \frac{s}{1000} = G \cdot s \cdot$$

Слѣдовательно, общее выраженіе силы тяги, развиваемой на окружности колеса, будетъ:

$$F = G \cdot (f + s) \text{ клг}^*.$$

Если r радіусъ колеса въ мтр, то вращающій моментъ относительно оси колеса будетъ:

$$F \cdot r = G \cdot (f + s) \cdot r \text{ клгр-мтр.}$$

Пусть c будетъ передаточное число, т. е. діаметръ ведущаго колеса, сидящаго на оси двигателя, дѣленный на діаметръ ведомаго колеса. Тогда число оборотовъ двигателя относится къ числу оборотовъ колеса вагона, какъ $1 : c$, при чемъ c меньше 1. Равнымъ образомъ вращающій моментъ двигателя относится къ вращающему моменту у оси колеса, какъ $c : 1$.

Примемъ во вниманіе еще коэффиціентъ полезнаго дѣйствія передачи η; тогда полный вращающій моментъ, развиваемый всѣми двигателями трамвая, выразится слѣдующимъ уравненіемъ:

$$\Sigma M_d = \frac{c \cdot F \cdot r}{\eta} = \frac{c \cdot G \cdot r \cdot (f + s)}{\eta}.$$

Въ данномъ примѣрѣ радіусъ колеса $r = 0{,}39$ мтр и передаточное число $c = 1 : 4{,}9$. Предположимъ, что вѣсъ вагона составляетъ 8 тоннъ, а коэффиціентъ тяги на данномъ пути $f = 12$ и средній коэффиціентъ полезнаго дѣйствія равенъ 0,8; тогда получаемъ:

$$\Sigma M_d = \frac{8 \cdot 0{,}39 \cdot (12 + s)}{4{,}9 \cdot 0{,}8} = 0{,}8 \cdot (12 + s) \cdot$$

Въ нашемъ примѣрѣ у вагона два двигателя, слѣдовательно, каждый долженъ дать половину полнаго вращающаго момента. Такимъ образомъ, для одного двигателя мы получаемъ:

$$M_d = \frac{\Sigma M_d}{2} = 0{,}4\,(12 + s) \cdot$$

Опредѣлимъ изъ этого уравненія s; тогда получаемъ подъемъ, который беретъ вагонъ при различныхъ значеніяхъ M_d,

$$s = 2{,}5 \cdot M_d - 12.$$

Такимъ образомъ, мы получаемъ значенія нижепомѣщенной таблицы, при чемъ значенія вращающаго момента M_d опредѣлялись согласно стр. 287. Отрицательныя значенія подъема обозначаютъ спускъ.

Намъ остается еще опредѣлить скорость вагона K въ километрахъ въ часъ. Число оборотовъ колеса въ часъ мы получимъ, умножая число оборотовъ двигателя въ минуту на 60 и на передаточное число c. Умножая это число оборотовъ на длину окружности колеса въ километрахъ, мы получимъ скорость вагона въ километрахъ въ часъ:

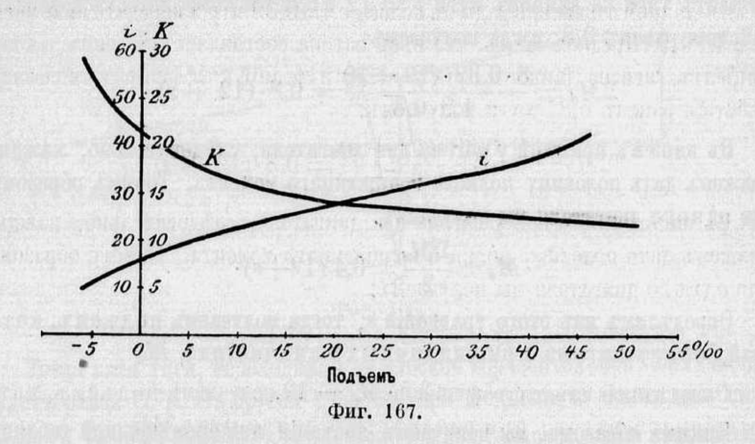
$$K = n \cdot 60 \cdot c \cdot \frac{2\,r\,\pi}{1\,000}$$

Подставляя вмѣсто r величину его 0,39 и вмѣсто c величину послѣдняго 1 : 4,9, мы получаемъ скорость вагона въ километрахъ въ часъ:

$$K = 0{,}03 \cdot n.$$

Всѣ эти величины вычислены и приведены въ предпослѣднемъ ряду нижеслѣдующей таблицы, при чемъ значенія n снова взяты съ стр. 288. Въ послѣднемъ ряду приведенъ полный токъ, входящій въ вагонъ $i = 2 \cdot i_a$. Тогда имѣемъ:

i_a	M_a	$s = 2{,}5 \cdot M_a - 12$	$K = 0{,}03 \cdot n$		$i = 2 \cdot i_a$
5	2,45	— 5,85 ‰	29	клм/часъ	10
10	7,85	+ 7,4 »	17,7	»	20
15	14,6	+ 24,6 »	13,8	»	30
20	21,3	+ 41,5 »	12,3	»	40
25	27,3	+ 56,5 »	11,7	»	50



Фиг. 167.

Нанося, теперь, подъемъ по оси абсциссъ, а соотвѣтствующія значенія полнаго входящаго въ двигатели вагона тока i и скорость вагона K по оси ординатъ, мы получаемъ, такимъ образомъ, кривыя, представленныя на фиг. 167.

68. Регулированіе двигателей съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

Число оборотовъ двигателя, согласно уравн. (43) стр. 263, равно:

$$n = \frac{(e - i_a \cdot w_a) \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot N \cdot z},$$

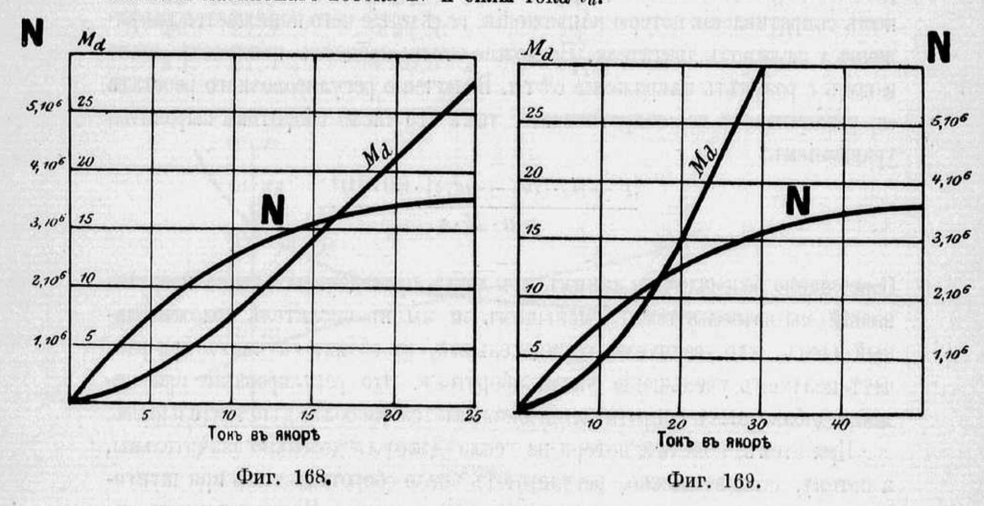
гдѣ подъ e разумѣютъ напряженіе у зажимовъ самого двигателя. Простѣйшимъ способомъ регулированія двигателя съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ будетъ регулированіе напряженія у зажимовъ при помощи пускового реостата. Токъ, соотвѣтствующій нагрузкѣ, производитъ тогда въ добавочномъ сопротивленіи потерю напряженія, вслѣдствіе чего понижается напряженіе у зажимовъ двигателя. Но можно этотъ процессъ понимаетъ иначе и подъ e разумѣть напряженіе сѣти. Включеніе регулировочнаго реостата w_1 увеличиваетъ все сопротивленіе, такъ что число оборотовъ выразится уравненіемъ:

$$n = \frac{\{e - i_a \cdot (w_a + w_1)\} \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot N \cdot z}.$$

Совершенно безразлично, какимъ изъ двухъ приведенныхъ выше представленій мы воспользуемся. Уменьшимъ ли мы въ числителѣ положительный членъ, или увеличимъ отрицательный, въ обоихъ случаяхъ при расчетѣ получимъ уменьшеніе числа оборотовъ. Это регулированіе при помощи добавочныхъ сопротивленій оказывается наиболѣе дѣйствительнымъ.

При этомъ, конечно, потери на тепло Джоуля довольно значительны, а потому, если возможно, регулируютъ число оборотовъ какъ при шунтовомъ двигателѣ—путемъ измѣненія магнитнаго поля. При уменьшеніи, напримѣръ, знаменателя въ вышеприведенныхъ уравненіяхъ, число оборотовъ n увеличивается. Конечно, такого ослабленія магнитнаго поля, какъ при шунтовомъ двигателѣ, при этомъ двигателѣ нельзя достигнуть путемъ включенія въ обмотку электромагнитовъ сопротивленія, ибо включенное такимъ образомъ сопротивленіе при двигателѣ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ дѣйствуетъ, какъ добавочное сопротивленіе. Поэтому реостатъ необходимо включать параллельно обмоткѣ электромагнитовъ. Благодаря этому достигаютъ того, что токъ въ якорѣ, который опредѣляется вращающимъ моментомъ, проходитъ черезъ сопротивленіе цѣпи возбужденія, не обладая полною своею силой.

Если ради упрощенія принять, что параллельно включенное сопротивленіе равно сопротивленію обмотки электромагнитовъ и что магнитный потокъ пропорціоналенъ намагничивающему току, то на первый взглядъ покажется, что магнитное поле сравнительно съ прежнимъ какъ будто уменьшилось вдвое, въ то время какъ число оборотовъ возрасло во столько же разъ. Но это предположеніе невѣрно. Какъ мы видѣли уже при шунтовомъ двигателѣ, ослабленіе магнитнаго поля при неизмѣняющейся нагрузкѣ должно неминуемо приводить къ усиленію тока въ якорѣ. Чтобы опредѣлить теперь силу тока, которая проходитъ черезъ якорь послѣ параллельнаго включенія добавочнаго сопротивленія, вычертимъ сначала обычнымъ способомъ характеристики двигателя безъ сопротивленія (фиг. 168). Ординатами кривой M_d будутъ произведенія соотвѣтствующихъ значеній магнитнаго потока N и силы тока i_a.



Фиг. 168. Фиг. 169.

Вычертимъ теперь на фиг. 169 тѣ же кривыя для двигателя съ параллельно включеннымъ сопротивленіемъ, которое равно сопротивленію обмотки электромагнитовъ. Кривая магнитнаго потока совершенно подобна той же кривой фиг. 168, только числовыя значенія абсциссъ по сравненію съ абсциссами фиг. 168 будутъ вдвое больше, такъ какъ равные магнитные потоки создаются равными намагничивающими токами, слѣдовательно, въ этомъ случаѣ двойнымъ токомъ въ якорѣ. Перемножая величины N и i_a, мы снова получимъ кривую M_d фиг. 169. Изъ фиг. 168 и 169 получаемъ соотвѣтствующія значенія тока и магнитнаго потока для одного и того же въ обоихъ случаяхъ вращающаго момента. Напримѣръ, безъ параллельно включеннаго сопротивленія

находимъ изъ фиг. 168 для нагрузки въ 14 клг-мтр токъ въ якорѣ въ 15 ампер. и магнитный потокъ въ $3{,}1 \cdot 10^6$ силовыхъ линій. При той же нагрузкѣ послѣ ослабленія поля изъ фиг. 169 получаемъ силу тока около 19 амп., магнитный потокъ $2{,}5 \cdot 10^6$ силовыхъ линій. Если мы пренебрежемъ незначительнымъ вліяніемъ омической потери напряженія, то числа оборотовъ будутъ обратно пропорціональны числу силовыхъ линій. Слѣдовательно въ данномъ случаѣ мы увеличили число оборотовъ въ отношеніи 3,1 : 2,5, включивъ параллельно сопротивленію обмотки электромагнитовъ сопротивленіе ему равновеликое.

Такъ какъ регулированіе числа оборотовъ путемъ включенія сопративленія параллельно обмоткѣ электромагнитовъ вызываетъ еще потерю на тепло Джоуля, то поэтому раньше очень часто измѣненіе магнитнаго потока производили путемъ переключенія обмотокъ электромагнитовъ. Катушки электромагнитовъ при троганіи съ мѣста включены послѣдовательно. Во время же полнаго хода вагона онѣ всѣ становятся включенными параллельно, такъ что въ каждую обмотку электромагнита входитъ только часть тока въ якорѣ (система Спрага).

Но за послѣднее время уже отказались отъ регулированія числа оборотовъ путемъ ослабленія магнитнаго поля [1]). Имѣется та опасность, что у вагона съ нѣсколькими двигателями магнитные потоки отдѣльныхъ двигателей не будутъ одинаковы. Это можетъ случиться, если магнитныя сопротивленія отдѣльныхъ двигателей неодинаковы, или если, вслѣдствіе повторнаго переключенія обмотокъ электромагнитовъ попортятся контакты, вслѣдствіе чего силы тока въ отдѣльныхъ вѣтвяхъ будутъ различны. При этомъ слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что при системѣ Спрага имѣютъ систему электромагнитовъ, которые съ обоими, параллельно включенными, якорями соединены послѣдовательно.

Вліяніе такихъ неправильностей можно пояснить на слѣдующемъ примѣрѣ. Положимъ у вагона имѣются два параллельно включенные двигателя, напряженіе у щетокъ которыхъ e равно 500 вольтъ, сопротивленіе якорей равно 1 ому. Пусть сила тока одного двигателя будетъ 15 амперъ. Тогда противоэлектродвижущая сила его будетъ:

$$E = 500 - 15 \cdot 1 = 485 \text{ вольтъ.}$$

Теперь предположимъ, что магнитное поле второго двигателя на 5% слабѣе послѣдняго у перваго двигателя. Такъ какъ второй двигатель рабо-

[1]) См. статью Sieber'а въ ETZ, 1901, стр. 36.

таетъ на томъ же вагонѣ, что и первый, то онъ дѣлаетъ совершенно то же число оборотовъ, что и послѣдній. Слѣдовательно, его электродвижущая сила на 5% слабѣе послѣдней перваго двигателя и составляетъ:

$$E = 485 \cdot 0{,}95 = 460 \text{ вольтъ.}$$

Поэтому во второй двигатель входитъ токъ силы:

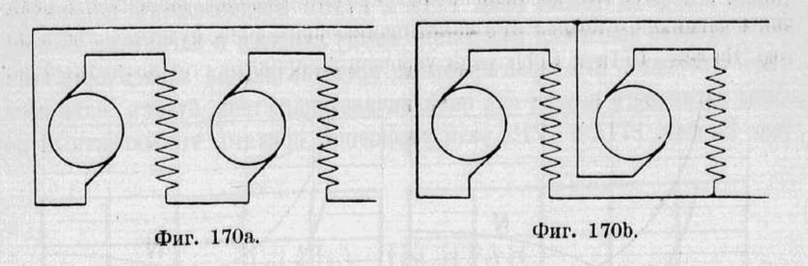
$$i_a = \frac{e - E}{w_a} = \frac{500 - 460}{1} = 40 \text{ амперъ.}$$

Слѣдовательно, въ вагонъ всего входитъ токъ силы въ $40 + 15 = 55$ амперъ. Изъ нихъ только 15 амп. идетъ въ двигатель сильнѣе возбужденный, а 40 амп. въ двигатель слабѣе возбужденный. Второй двигатель, слѣдовательно, производитъ работу почти втрое большую перваго. Не трудно разсчитать тѣ условія, при которыхъ противоэлектродвижущая сила одного двигателя, вслѣдствіе его болѣе сильнаго возбужденія, будетъ равна напряженію у зажимовъ, такимъ образомъ сила его тока и его мощность станутъ равными нулю. Но можетъ случиться такъ, что при данномъ числѣ оборотовъ электродвижущая сила двигателя болѣе возбужденнаго будетъ больше напряженія у зажимовъ, двигатель, какъ генераторъ, станетъ посылать токъ въ сѣть или въ другой двигатель. Тогда второму двигателю придется не только тащить вагонъ, но приводить также въ движеніе первый двигатель, работающій, какъ генераторъ. Послѣдствіемъ этого, понятно, явится разрушеніе якоря двигателя слабѣе возбужденнаго вслѣдствіе чрезмѣрнаго въ немъ тепла Джоуля.

Впрочемъ часто случается также, что сопротивленія якорей параллельно включенныхъ двигателей неодинаковы, что причиняетъ также не малый вредъ при примѣненіи схемы Спрага.

Въ виду этого отказываются теперь отъ измѣненія числа оборотовъ путемъ регулированія обмотки электромагнитовъ и довольствуются часто регулированіемъ при помощи добавочнаго сопротивленія. При этомъ якорь двигателя останется постоянно соединеннымъ съ обмоткою электромагнитовъ, такъ что одинъ и тотъ же токъ проходитъ черезъ якорь и электромагниты двигателя. Здѣсь еще возможно, путемъ включенія обоихъ двигателей послѣдовательно, значительно ослаблять токъ и мощность при трогании съ мѣста. Каждый двигатель служитъ при этомъ одинаково добавочнымъ сопротивленіемъ другому (фиг. 170а), и поэтому на каждый двигатель приходится половина напряженія. Въ то же время съ силовой станціи поступаетъ неразвѣтвляющійся токъ, что при сильномъ

токѣ, потребномъ при трогании съ мѣста, является очень важнымъ. Во время полнаго хода двигатели соединяются параллельно (фиг. 170b). Тогда казалось бы тоже, что опасность неравномѣрнаго распредѣленія силы тока



Фиг. 170а. Фиг. 170b.

и нагрузки при неодинаковыхъ внутреннихъ сопротивленіяхъ или неодинаковомъ напряженіи поля въ этомъ случаѣ не исключается. Пусть, напримѣръ, сопротивленіе одного изъ якорей нѣсколько больше другого, тогда, казалось бы, сила тока, согласно уравненію:

$$i_a = \frac{e - E}{w_a}$$

будетъ чрезвычайно мала по сравненію съ другимъ параллельно включеннымъ двигателемъ. Но такъ какъ въ то же время благодаря этому магнитный потокъ и противоэлектродвижущая сила этого двигателя уменьшатся, то неравномѣрность почти совершенно сглаживается. Положимъ, для двигателя даны слѣдующія значенія:

$$e = 500, \quad N = 3 \cdot 10^6, \quad i_a = 20, \quad w_a = 2.$$

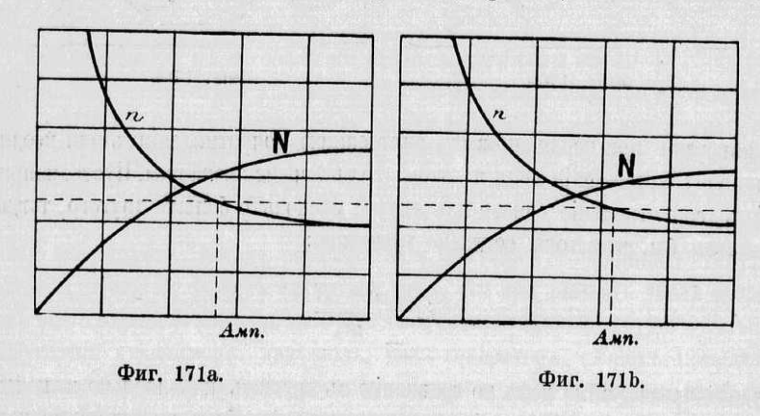
Сопротивленіе второго двигателя пусть будетъ иное, чѣмъ перваго двигателя. Согласно этому пусть сила тока у него будетъ 18 амп., и этому току пусть соотвѣтствуетъ изъ характеристики магнитный потокъ въ $2{,}9 \cdot 10^6$ силовыхъ линій. Требуется найти сопротивленіе x второго двигателя. Такъ какъ оба двигателя имѣютъ одно и то же число оборотовъ, то, на основаніи уравн. (43) стр. 263, имѣемъ:

$$n = \frac{(500 - 20 \cdot 2) \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot z} = \frac{(500 - 18 \cdot x) \cdot 60 \cdot 10^8}{p/a \cdot 2{,}9 \cdot 10^6 \cdot z}.$$

Отсюда получаемъ:

$$x = 3.$$

Мы видимъ, что увеличеніе сопротивленія въ отношеніи $3:2$ имѣетъ послѣдствіемъ уменьшеніе тока только въ отношеніи $18:20$. Равнымъ образомъ, разница въ магнитныхъ потокахъ обоихъ двигателей будетъ также всегда ничтожна (фиг. 171a и 171b). Предположимъ, напримѣръ, что у второго двигателя разстояніе между якоремъ и магнитами больше, чѣмъ у перваго. Его характеристика, представляющая зависимость величины магнитнаго потока отъ намагничивающаго тока, будетъ болѣе пологою. На фиг. 171a и 171b, ради упрощенія, принято, что магнитный по-



Фиг. 171a. Фиг. 171b.

токъ второго двигателя для одного и того же тока на 10% меньше, чѣмъ у перваго двигателя. Если, теперь, принимая напряженіе у зажимовъ одинаковымъ и пренебрегая внутреннимъ сопротивленіемъ, вычертимъ кривыя чиселъ оборотовъ обоихъ двигателей, то кривая числа оборотовъ второго двигателя расположится выше той же кривой перваго двигателя. Для любого одинаковаго для обоихъ двигателей числа оборотовъ, какъ это указано пунктирной горизонтальной линіей, у второго двигателя, конечно, получается токъ сильнѣе, чѣмъ у перваго. Но разность между обоими токами никогда не достигаетъ тѣхъ большихъ размѣровъ, которые мы видѣли при схемѣ Спрага. Двигатель, обладающій большимъ магнитнымъ сопротивленіемъ, развиваетъ, конечно, болѣе слабую противоэлектродвижущую силу, а потому сила тока въ якорѣ этого двигателя будетъ больше. Но такъ какъ этотъ токъ одновременно проходитъ и черезъ электромагнитъ того же двигателя, то онъ намагничиваетъ ихъ сравнительно сильно, такъ что разности между магнитными потоками не могутъ принять значительныхъ размѣровъ.

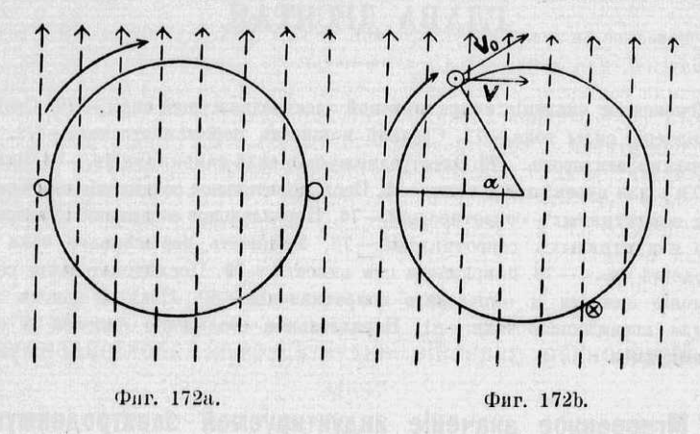
ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

69. Мгновенное значеніе индуктируемой электродвижущей силы.

При вращеніи проволочнаго контура въ однородномъ магнитномъ полѣ въ контурѣ индуктируются электродвижущія силы, измѣняющіяся въ зависимости отъ времени по направленію и по величинѣ. Пусть на фиг. 172a и 172b вокругъ оси, перпендикулярной къ магнитному потоку, вращается проволочный прямоугольный контуръ, намотанный на цилиндръ изъ немагнитнаго матеріала. Направленіе магнитныхъ линій обозначено пунктирными линіями. На фиг. 172a плоскость контура занимаетъ положеніе перпендикулярное къ магнитному потоку, и число силовыхъ линій, пересѣкающихъ плоскость контура, будетъ наибольшимъ. Направленіе вращенія въ этотъ моментъ индуктируемаго проводника, расположеннаго на боковой поверхности цилиндра, будетъ параллельно направленію магнитнаго потока, и индуктируемая электродвижущая сила будетъ равна нулю. Поэтому положеніе, указанное на фиг. 172a, называемъ нулевымъ. Въ мо-

ментъ, представленный на фиг. 172b, плоскость контура образуетъ съ нулевымъ положенiемъ уголъ α. Въ этотъ моментъ проводники, расположенные на боковой поверхности цилиндра, рѣжутъ силовыя линiи подъ нѣкоторымъ угломъ, и въ этихъ послѣднихъ индуктируется электродвижущая сила, направленiе которой опредѣлится по закону Фарадея. Предполагая, что барабанъ вращается по часовой стрѣлкѣ и что магнитный потокъ на чертежѣ идетъ снизу вверхъ, мы получимъ въ индуктиремыхъ проводникахъ направленiе тока, показанное условными обозначенiями на фигурѣ.

Электродвижущая сила при этомъ тѣмъ больше, чѣмъ больше пересѣкается въ секунду силовыхъ линiй, т. е. чѣмъ ближе уголъ наклона плоскости контура къ прямому, и достигаетъ своего наибольшаго значе-



Фиг. 172a. Фиг. 172b.

нiя при равенствѣ этого угла прямому, т. е. когда плоскость контура становится параллельною силовымъ линiямъ и ни одна изъ этихъ послѣднихъ не будетъ ея пересѣкать. При дальнѣйшемъ вращенiи мгновенное значенiе электродвижущей силы опять убываетъ и доходитъ до нуля, когда плоскость контура займетъ снова нулевое положенiе. Въ этотъ моментъ измѣняется направленiе, по которому индуктируемые проводники пересѣкаютъ магнитный потокъ. Пока проводникъ находится въ верхней половинѣ барабана, онъ пересѣкаетъ магнитный потокъ на фиг. 172b слѣва направо. Перейдя въ нижнюю часть барабана, онъ уже пересѣкаетъ его справа налѣво. Вслѣдствiе этого въ этотъ моментъ индуктируемая электродвижущая сила измѣняется не только по величинѣ, но и по направленiю.

Пусть обозначаютъ:

$\boldsymbol{H}$ напряженiе поля, выражающееся числомъ силовыхъ линiй приходящихся на квадратный сантиметръ,

$\boldsymbol{N}$ число силовыхъ линiй, обхватываемыхъ контуромъ при нулевомъ положенiи,

v_a постоянная окружная скорость въ сант/сек,

n число оборотовъ въ минуту,

$\boldsymbol{D}$ дiаметръ барабана въ сант,

$\boldsymbol{b}$ длину индуктируемаго проводника въ сант,

z' число послѣдовательно соединенныхъ индуктируемыхъ проводниковъ (въ случаѣ, когда обмотки состоятъ изъ ряда отдѣльныхъ катушекъ, то z' обозначаетъ также все число послѣдовательно соединенныхъ витковъ).

Тогда общее выраженiе мгновеннаго значенiя электродвижущей силы, согласно уравн. (28) стр. 79, будетъ:

$$E = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{l} \cdot \boldsymbol{v} \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

При этомъ вмѣсто индуктируемой длины проводника $\boldsymbol{l}$ въ этомъ случаѣ надо подставить произведенiе $z'.\boldsymbol{b}$. Далѣе изъ фиг. 172b ясно, что проводникъ, вращающiйся со скоростью v_o, въ единицу времени пересѣчетъ столько силовыхъ линiй, сколько онъ пересѣкъ бы при движенiи перпендикулярно къ магнитному потоку съ меньшей скоростью $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_o \cdot \sin\alpha$. Но

$$\boldsymbol{v}_o = \boldsymbol{D} \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}.$$

Подставляя найденныя выраженныя для $\boldsymbol{l}$ и $\boldsymbol{v}$ въ уравненiе для электродвижущей силы, получаемъ:

$$E = \boldsymbol{H} \cdot z' \cdot \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{D} \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot \sin\alpha \cdot 10^{-8}.$$

Въ этомъ уравненiи $\boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{D}$—площадь плоскости контура въ квадр. сант. Такъ какъ число силовыхъ линiй на квадр. сант. равно $\boldsymbol{H}$, то произведенiе $\boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{D}$ представляетъ все число силовыхъ линiй $\boldsymbol{N}$, пересѣкающихъ плоскость контура. Поэтому напишемъ послѣднее уравненiе короче:

$$E = \pi \cdot \boldsymbol{N} \cdot \frac{n}{60} \cdot z' \cdot 10^{-8} \cdot \sin\alpha \quad . \ . \ . \ . \ (44)$$

Мгновенное значенiе электродвижущей силы измѣняется, слѣдовательно, съ синусомъ угла, образуемаго плоскостью контура съ нулевымъ положенiемъ. Для $\alpha = 0$ также $E = 0$. При $\alpha = 90^o$, $\sin\alpha = 1$; электродвижущая сила въ этомъ случаѣ, т. е. когда плоскость контура параллельна

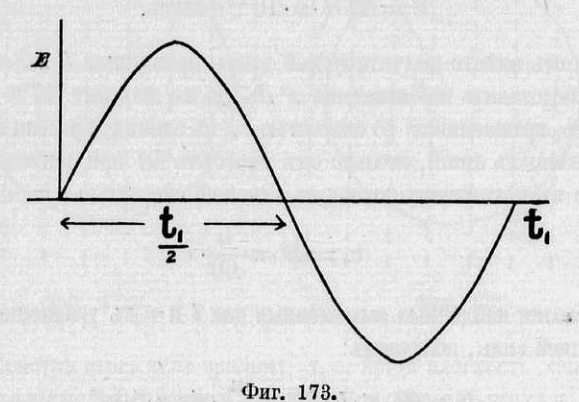
силовымъ линіямъ, будетъ имѣть свое наибольшее значеніе. Послѣднее изъ уравн. (44) будетъ:

$$E_{max} = \pi \cdot \boldsymbol{N} \cdot \frac{n}{60} \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Слѣдовательно, уравн. (44) мы можемъ представить въ видѣ:

$$E = E_{max} \cdot \sin \alpha.$$

Для значеній α между 0 и 180° $\sin \alpha$ будетъ положительнымъ, для значеній α между 180° и 360° онъ будетъ отрицательнымъ. Это означаетъ въ нашемъ случаѣ, что электродвижущая сила при $\alpha = 180°$ мѣняетъ свое направленіе. Если отложимъ, теперь, дуги по оси абсциссъ, а электродвижущія силы по оси ординатъ, то получимъ общеизвѣстную синусоиду. Но ничто намъ не мѣшаетъ принять за независимую перемѣнную время t и



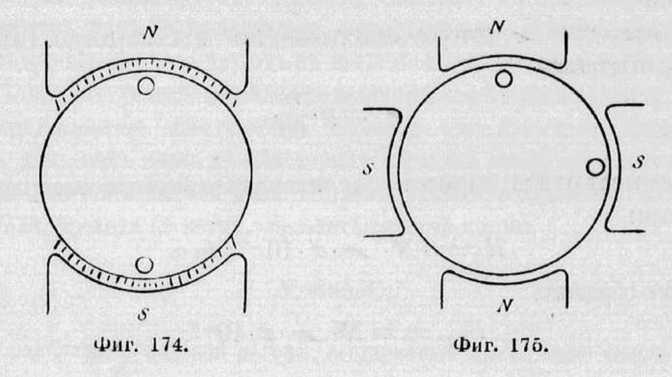
Фиг. 173.

электродвижущую силу представить въ видѣ функціи времени. Пусть ω означаетъ угловую скорость, т. е. дугу, проходимую въ секунду; тогда дуга α, откладываемая за время t, будетъ равна $\omega \cdot t$, и, подставляя это выраженіе въ уравненіе для мгновеннаго значенія, получаемъ:

$$E = E_{max} \cdot \sin (\omega t).$$

Если затѣмъ по оси абсциссъ отложимъ вмѣсто дуги α время t, то измѣнится только масштабъ, и мы получимъ кривую, изображенную на фиг. 173. Послѣдняя даетъ намъ наглядную картину измѣненія электродвижущей силы въ зависимости отъ времени. Время t_1 одного полнаго оборота, соотвѣтствуетъ дугѣ 2π. Въ теченіе этого періода времени электродвижущая сила достигаетъ своего какъ положительнаго, такъ и отрицательнаго наибольшаго значенія, и послѣ одного полнаго оборота процессъ этотъ повторяется снова. Тотъ промежутокъ времени, черезъ который наступаетъ снова то же самое состояніе, называютъ временемъ полнаго періода. Въ теченіе этого промежутка происходятъ двѣ перемѣны направленія электродвижущей силы или какъ бы дважды перемѣна полюсовъ по отношенію къ контуру. Обычное число 50 періодовъ въ секунду соотвѣтствуетъ 100 перемѣнамъ въ секунду.

Законъ, согласно которому электродвижущая сила является синусоидальной функціей времени, остается приблизительно вѣрнымъ и тогда, когда передъ полюсами электромагнита (фиг. 174) вращается катушка, намотанная на железный барабанъ. Ясно, что здѣсь мы будемъ имѣть дѣло съ другимъ распредѣленіемъ силовыхъ линій, чѣмъ въ предыдущемъ слу-



Фиг. 174. Фиг. 175.

чаѣ. Силовыя линіи входятъ здѣсь въ якорь по большей части нормально къ его боковой поверхности, и законъ зависимости индуктируемой электродвижущей силы отъ наклона плоскости контура здѣсь уже не имѣетъ мѣста. Вслѣдствіе закругленія краевъ полюса переходъ изъ нейтральнаго пояса къ полю наибольшаго напряженія передъ полюсами совершается постепенно. Поэтому мы безъ особой погрѣшности можемъ принять, что напряженіе поля передъ серединой полюса будетъ наибольшее, и оно будетъ уменьшаться по направленію къ нейтральному поясу, слѣдуя синусоидальному закону. Индуктируемая электродвижущая сила тогда будетъ снова синусоидальной функціей времени, и уравненіе (44) будетъ опять имѣть мѣсто. При этомъ подъ $\boldsymbol{N}$ надо разумѣть, какъ и прежде, наибольшее число силовыхъ линій, обхватываемыхъ виткомъ катушки. Но въ данномъ случаѣ это равносильно числу силовыхъ линій, исходящему изъ сѣвернаго полюса.

Для многополюсныхъ машинъ съ p парами полюсовъ наше уравненіе должно принять другой видъ. Обмотка въ данномъ случаѣ производится подобно обмоткѣ якоря машины постояннаго тока, а именно: отъ середины сѣвернаго полюса черезъ торцевую поверхность къ серединѣ близлежащаго южнаго полюса (фиг. 175). Но тогда магнитный потокъ N за одинъ оборотъ пересѣчется въ p бóльшее число разъ, чѣмъ при двухполюсной машинѣ съ одинаковымъ числомъ проволокъ. Слѣдовательно, мы получимъ въ p разъ бóльшую электродвижущую силу, и вообще будемъ имѣть:

$$E = \pi \cdot N \cdot p \cdot \frac{n}{60} \cdot z' \cdot 10^{-8} \cdot \sin\alpha,$$

гдѣ $p \cdot \frac{n}{60}$ представляетъ число періодовъ въ секунду и для него мы примемъ обозначеніе $\sim$, которое заимствовано изъ вида синусоиды. Слѣдовательно, подставляя

$$\sim\, = p \cdot \frac{n}{60},$$

получаемъ слѣдующее выраженіе для мгновеннаго значенія электродвижущей силы:

$$E = \pi \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8} \cdot \sin\alpha.$$

Равнымъ образомъ:

$$E_{max} = \pi \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Эти уравненія одинаково пригодны какъ для двухъ, такъ и для многополюсныхъ машинъ. При этомъ уголъ α, конечно, измѣняетъ свое значеніе. У четырехполюсной машины, напримѣръ (фиг. 175), перемѣщеніе проводника изъ нулевого положенія до середины полюса соотвѣтствуетъ прохожденію имъ въ пространствѣ угла въ 45°. Электродвижущая сила возрастетъ при этомъ отъ нуля до своего наибольшаго значенія, такъ что для положенія передъ серединой полюса $\sin\alpha$ долженъ достигать своего наибольшаго значенія 1. Слѣдовательно, подставляя $\alpha = 45°$ мы не получимъ соотвѣтствующаго значенія электродвижущей силы. Изъ этого затрудненія можно выйти, подставляя во всѣ уравненія вмѣсто $\sin\alpha$ величину $\sin(p \cdot \alpha)$, при чемъ α тогда обозначаетъ дѣйствительный уголъ поворота въ пространствѣ. Но можно поступить проще, если условимся считать одинъ градусъ не за 360-ую часть одного полнаго оборота, а за 360-ую часть одного періода. Въ этомъ случаѣ дуга 2π будетъ соотвѣтствовать одному полному періоду, а дуга π—половинѣ періода или промежутку времени, въ

который проволока якоря пройдетъ разстояніе между двумя серединами сосѣднихъ разноименныхъ полюсовъ, т. е. полюсное дѣленіе. Ошибка, благодаря такому опредѣленію, совершенно исключается.

При $\sim$ періодахъ въ секунду будетъ пройдена въ секунду дуга $2\pi \cdot \sim$ и

$$\omega = 2\pi \cdot \sim.$$

Мало по малу въ вышеуказанныхъ разсужденіяхъ уголъ въ пространствѣ α вытѣсняется величиною ωt, зависящей отъ времени, и величина ω теряетъ свое значеніе угла пространства и уже означаетъ не дугу, отложенную въ единицу времени, а 6,28-кратное число періодовъ въ секунду.

Понятно, вначалѣ всякое понятіе, связанное съ представленіемъ о пространствѣ, какъ болѣе наглядное, легче доступно пониманію, чѣмъ явленія, слѣдующія другъ за другомъ въ извѣстной послѣдовательности по времени. Такое отступленіе заранѣе отъ величинъ, связанныхъ исключительно съ представленіемъ пространства, является уже большимъ преимуществомъ, такъ какъ иначе въ нѣкоторыхъ случаяхъ совершенно немыслимо было бы достичь желаемой цѣли. Напримѣръ, токъ, создаваемый согласно фиг. 172а, проходя по витку, образуетъ силовой потокъ

$$N \cdot \sin(\omega t),$$

гдѣ N наибольшій силовой потокъ, создаваемый наибольшею силою тока. Такъ какъ силовой потокъ, пронизывающій витокъ, измѣняется въ зависимости отъ времени, то индуктируется электродвижущая сила, мгновенное значеніе которой опредѣляется по уравн. (27) стр. 78:

$$E = -\frac{dN \cdot 10^{-8}}{dt} = -N \cdot \omega \cdot (\cos\omega t) \cdot 10^{-8}.$$

Подставимъ теперь $\omega t = \alpha$; тогда величина α совершенно не связана съ представленіемъ о пространствѣ, и мы должны называть α угломъ, связаннымъ съ представленіемъ о времени.

70. Среднее значеніе силы тока.

Въ предыдущей статьѣ мы видѣли, что электродвижущая сила индукціи является синусоидальной функціей времени. При предположеніи, что въ цѣпи тока существуетъ только омическое сопротивленіе и совершенно отсутствуетъ самоиндукція, сила тока въ каждое мгновеніе получится путемъ дѣленія соотвѣтствующей электродвижущей силы на постоянное сопротивленіе. При этомъ у нашей синусоиды измѣнится только масштабъ ординатъ. Такимъ образомъ, мгновенное значеніе силы тока также измѣняется соотвѣтственно синусу угла α, который образуетъ плоскость витка съ нулевымъ положеніемъ, и для мгновеннаго значенія силы тока получаемъ:

$$i = i_{max} \cdot \sin \alpha .$$

Для опредѣленія средняго значенія силы тока опытнымъ путемъ, приключимъ концы одного витка проволоки на якорѣ къ коммутатору съ двумя пластинами, съ которымъ мы ознакомились въ ст. 43. Тогда во внѣшней цѣпи мы получимъ пульсирующій выпрямленный токъ. Если пропустить этотъ послѣдній черезъ мѣдный вольтамеръ, то выдѣлившееся вѣсовое количество явится мѣрою количества электричества, приведеннаго въ движеніе за это время. Раздѣлимъ это вѣсовое количество m въ миллиграммахъ на время t и на электрохимическій вѣсовой эквивалентъ 0,328; тогда получимъ среднее значеніе силы тока:

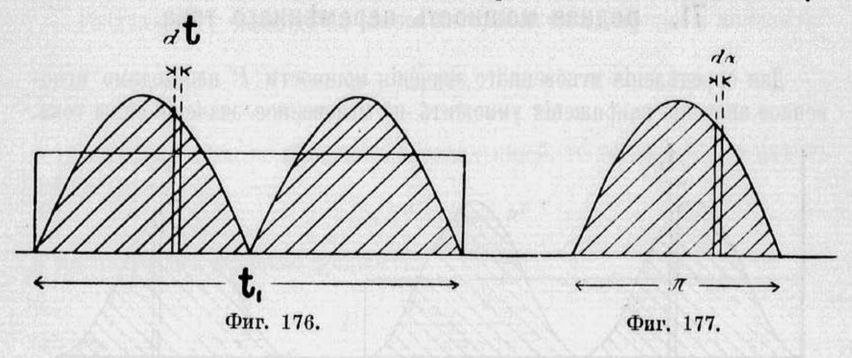
$$i_{среднее} = \frac{m}{0{,}328 \cdot t} .$$

Найденную такимъ электролитическимъ путемъ величину называютъ среднимъ значеніемъ силы тока. Для опредѣленія этой послѣдней графически нанесемъ время t по оси абсциссъ, а силу тока i по оси ординатъ. Спустя опредѣленное время t, считая отъ нулевого положенія, сила тока будетъ равна:

$$i = i_{max} \cdot \sin \alpha = i_{max} \cdot \sin (\omega \cdot t).$$

Въ теченіе безконечно малаго промежутка времени dt мы можемъ эту силу тока считать за постоянную. Такъ какъ послѣдняя опредѣляется, какъ количество электричества, протекающее въ секунду, то произведеніе $i \cdot dt$ или площадь узкой вертикальной полоски на фиг. 176, представляетъ собою количество электричества, приведенное въ теченіе времени dt въ движеніе. Все же количество электричества, приведенное въ движеніе за время t_1 одного періода, представитъ собою сумму площадей всѣхъ полосокъ или всю заштрихованную площадь. Для полученія средняго значенія силы тока раздѣлимъ эту площадь, т. е. все количество электричества, на время. Замѣнимъ эту площадь прямоугольникомъ, имѣющимъ то же основаніе. Высота этого прямоугольника тогда будетъ искомымъ среднимъ значеніемъ.

Это среднее значеніе можно получить приближенно, если опредѣлить среднее значеніе величинъ $\sin 0°$, $\sin 10°$, $\sin 20°$ и т. д. до $\sin 90°$ и умножить его на i_{max}. При точномъ же опредѣленіи мы вычисляемъ путемъ интегрированія площадь, ограниченную синусоидой и осью абсциссъ за половину періода. Это вычисленіе становится наиболѣе простымъ, если нанести по оси абсциссъ дуги (фиг. 177). Площадь вертикальной полоски на фиг. 177:



Фиг. 176. Фиг. 177.

$$i \cdot d\alpha = i_{max} \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha .$$

Для опредѣленія всей заштрихованной площади на фиг. 177, мы должны просуммировать это выраженіе между предѣлами 0 и π, и получаемъ:

$$\sum_0^{\pi} i \cdot d\alpha = i_{max} \int_0^{\pi} \sin \alpha \cdot d\alpha = 2 \cdot i_{max} .$$

Если раздѣлимъ, теперь, эту площадь на основаніе π, то получимъ среднее значеніе силы тока:

$$i_{среднее} = \frac{2}{\pi} \cdot i_{max} = 0{,}636 \cdot i_{max} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (45)$$

Такимъ образомъ, среднее значеніе силы тока относится къ своему наибольшему значенію, какъ $2 : \pi$ или $7 : 11$. При этомъ, конечно, предпо-

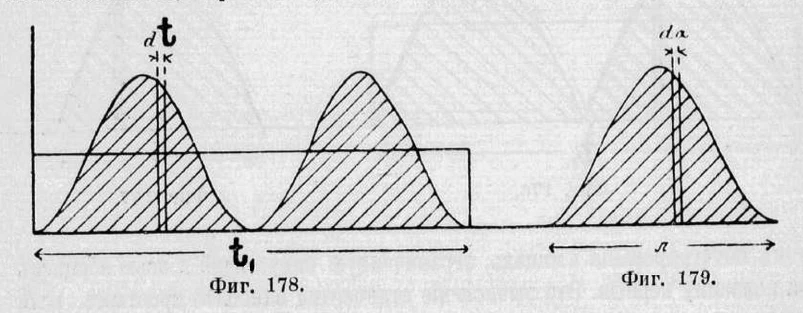
лагается, что сила тока—синусоидальная функція времени. Подобнымъ же образомъ получимъ среднее значеніе электродвижущей силы.

$$E_{среднее} = \frac{2}{\pi} \cdot E_{max} = 0{,}636 \cdot E_{max}.$$

Въ техникѣ, однако, эти среднія значенія играютъ второстепенную роль, такъ какъ для вычисленія мощности ими не пользуются, что увидимъ въ послѣдующей главѣ.

71. редняя мощность перемѣннаго тока.

Для опредѣленія мгновеннаго значенія мощности P необходимо мгновенное значеніе напряженія умножить на мгновенное значеніе силы тока.



Фиг. 178. Фиг. 179.

Вмѣсто этого можно возвести въ квадратъ мгновенное значеніе силы тока и умножить его на сопротивленіе. Тогда мгновенное значеніе мощности будетъ:

$$P = e_{max} \cdot sin\alpha \cdot i_{max} \cdot sin\alpha = (i_{axm} \cdot sin\alpha)^2 \cdot w.$$

Отложимъ, теперь, мгновенное значеніе мощности по оси ординатъ, тогда получимъ кривую фиг. 178. Такъ какъ мощность представляетъ собою работу, производимую въ секунду, то площадь цѣлой полоски $P \cdot dt$ на фиг. 178 будетъ равна работѣ за время dt. Вся заштрихованная площадь представитъ тогда работу за одинъ періодъ. Если раздѣлимъ эту площадь на время t_1, то получимъ среднюю работу въ секунду, т. е. среднюю мощность. Замѣнимъ заштрихованную площадь прямоугольникомъ, имѣющимъ то же основаніе; тогда высота опредѣлитъ искомую среднюю мощность. Она будетъ равна половинѣ наибольшей мощности.

Къ тому же результату приводитъ насъ и вычисленіе. Для наибольшаго упрощенія этого послѣдняго отложимъ по оси абсциссъ не время, а дугу α (фиг. 179). Узкая полоска на фиг. 179 будетъ тогда равна $P \cdot d\alpha$. Воспользовавшись полученнымъ выше значеніемъ для P и интегрируя по частямъ, мы имѣемъ полную заштрихованную площадь на фиг. 179 равною:

$$\int_0^\pi P \cdot d\alpha = \int_0^\pi i^2_{max} \cdot w \cdot sin^2\alpha \cdot d\alpha = i^2_{max} \cdot w \left[\frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} sin\alpha\ cos\alpha\right]_0^\pi = $$
$$= i^2_{max} \cdot w \cdot \frac{\pi}{2}.$$

Раздѣляя эту площадь на основаніе π, получаемъ среднюю мощность:

$$P = \frac{i^2_{max} \cdot w}{2}.$$

Если цѣпь тока не обладаетъ самоиндукціей, то тогда для нея имѣетъ мѣсто уравненіе:

$$E_{max} = i_{max} \cdot w$$

и мы получаемъ среднюю мощность:

$$P = \frac{E_{max} \cdot i_{max}}{2}.$$

Но интересно, что полученный выше результатъ можно вывести и безъ интегрированія, хотя расчетъ тогда будетъ меньше соотвѣтствовать сущности явленія. Вообразимъ для этого двѣ одинаковыя самостоятельныя катушки, намотанныя на барабанномъ якорѣ двухполюсной машины и смѣщенныя относительно другъ друга на 90°. Пусть обѣ катушки будутъ замкнуты равнымъ по величинѣ внѣшнимъ сопротивленіемъ. Когда плоскость одной изъ катушекъ будетъ составлять съ нулевымъ положеніемъ уголъ α, тогда другая катушка образуетъ съ нулевымъ положеніемъ уголъ $90° - \alpha$, и мгновенное значеніе мощности обѣихъ катушекъ вмѣстѣ будетъ:

$$E_{max} \cdot i_{max} \cdot (sin^2\alpha + sin^2[90 - \alpha]) = E_{max} \cdot i_{max} \cdot (sin^2\alpha + cos^2\alpha).$$

Такъ какъ $sin^2\alpha + cos^2\alpha$ равняется 1, то отсюда вытекаетъ, что полная мгновенная мощность въ каждый моментъ постоянна и равна $E_{max} \cdot i_{max}$. Эта послѣдняя, понятно, равна суммѣ среднихъ мощностей обѣихъ катушекъ, а потому средняя мощность каждой катушки будетъ равна половинѣ этой величины, т. е. какъ выше:

$$P = \frac{E_{max} \cdot i_{max}}{2}.$$

Если бы мы для опредѣленія мощности перемножили между собою среднія значенія напряженія и силы тока, то получили бы $\frac{2}{\pi} \cdot E_{max} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot i_{max} = 0{,}405\ E_{max} \cdot i_{max}$. Ошибка была бы въ 20%.

Теперь опредѣлимъ и вычислимъ величины напряженія и силы тока, которыя непосредственно пригодны для опредѣленія мощности. Для этой цѣли перепишемъ уравненіе для P въ слѣдующемъ видѣ:

$$P = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \cdot w\,.$$

Въ этомъ уравненіи выраженіе $\frac{i_{max}}{\sqrt{2}}$ представляетъ силу тока, которая, будучи возвышена въ квадратъ и умножена на сопротивленіе, даетъ среднюю мощность. Эту силу тока называютъ среднею квадратичною силою тока, дѣйствующимъ значеніемъ, или дѣйствующею силою тока и обозначаютъ буквою i. Вводить различныя обозначенія для дѣйствующей силы тока и мгновенной не слѣдуетъ, такъ какъ смѣшать ихъ совершенно невозможно. Слѣдовательно, имѣемъ:

$$i = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ i_{max}\,. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (46)$$

Такимъ образомъ дѣйствующая сила тока опредѣляется:

1. Какъ величина, которая, будучи возвышена въ квадратъ и умножена на сопротивленіе, даетъ среднюю мощность;

2. Какъ корень квадратный изъ средняго значенія квадратовъ мгновенныхъ значеній;

3. При синусоидѣ, какъ 0,707 наибольшаго значенія силы тока.

Такъ какъ среднее значеніе силы тока, опредѣляемое электролитическимъ путемъ, составляетъ $^7/_{11}$ наибольшаго значенія, то отношеніе между дѣйствующимъ значеніемъ и среднимъ равно 11 : 10. Если бы мы пожелали, напримѣръ, амперметръ перемѣннаго тока градуировать, примѣняя для этого коммутаторъ и вольтаметръ, то мы должны были бы среднюю силу тока, опредѣляемую по выдѣленію въ вольтаметрѣ, умножить на 1,1 и эту величину нанести на шкалу. Но удобнѣе это градуированіе производить постояннымъ токомъ. Это можно безъ всякихъ оговорокъ произвести у приборовъ, у которыхъ отклоненіе стрѣлки зависитъ отъ квадрата мгновеннаго значенія силы тока. Они какъ бы автоматически даютъ среднее значеніе квадратовъ мгновенныхъ значеній и показываютъ, если они градуированы постояннымъ токомъ, какъ разъ дѣйствующую силу перемѣннаго тока.

Къ нимъ принадлежатъ тепловые приборы, у которыхъ тепло Джоуля создаетъ удлиненіе платиновой проволоки, по которой проходитъ токъ, и тѣмъ самымъ вызываетъ отклоненіе стрѣлки. Такъ какъ температура платиновой проволоки не слѣдуетъ за періодическими колебаніями мощности, и такъ какъ приборъ вообще обладаетъ извѣстной инертностью, то онъ какъ бы автоматически указываетъ среднюю ариѳметическую изъ мгновенныхъ значеній мощности, которая въ проволокѣ превращается въ тепло Джоуля. На шкалѣ же нанесено дѣйствующее значеніе, т. е. та сила постояннаго тока, которая при прохожденіи черезъ платиновую проволоку превратила бы въ тепло Джоуля то же самое количество энергіи, какъ и періодически мѣняющійся перемѣнный токъ. Отсюда вытекаетъ, что приборъ долженъ имѣть одну и ту же шкалу для постояннаго и перемѣннаго токовъ.

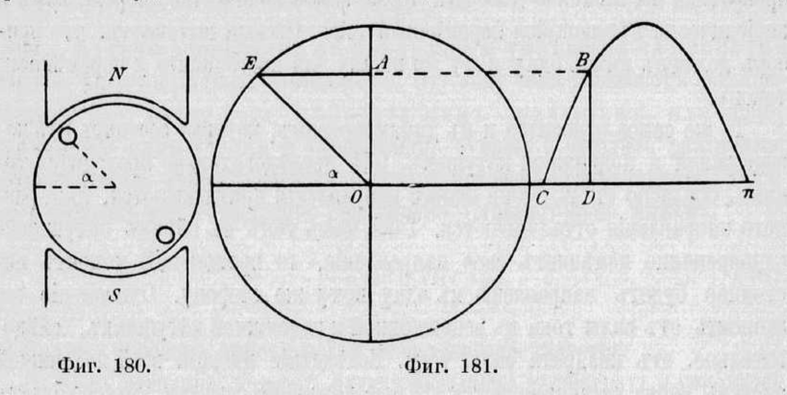
То же самое относится и къ динамометрамъ, которые состоятъ изъ неподвижной и подвижной катушекъ. Обѣ послѣдовательно проходятся токомъ. Согласно ст. 25, токи одного направленія притягиваются, токи разнаго направленія отталкиваются. Такъ какъ токъ въ обѣихъ катушкахъ одновременно измѣняетъ свое направленіе, то вращающій моментъ постоянно будетъ направленъ въ одну и ту же сторону. Отклоненіе же зависитъ отъ силы тока въ неподвижной и подвижной катушкахъ, слѣдовательно, отъ квадрата силы тока. Вслѣдствіе инерціи всей подвижной системы снова устанавливается среднее показаніе стрѣлки, которое будетъ вызвано средней силой или среднимъ ариѳметическимъ значеніемъ изъ квадратовъ силъ тока. Корень квадратный изъ средней ариѳметической квадратовъ или дѣйствующая сила тока наносится тогда на шкалу. Это опять та сила постояннаго тока, которая при прохожденіи черезъ обмотку вызываетъ то же отклоненіе, что и періодически измѣняющійся токъ. Слѣдовательно, шкала для постояннаго тока и для дѣйствующей силы перемѣннаго тока будетъ одною и той же. То же самое, понятно, относится и къ ваттметру.

Нѣсколько иначе дѣйствуютъ приборы, въ которыхъ катушка при прохожденіи по ней тока дѣйствуетъ, какъ направляющая или притягивающая желѣзный стержень. Величина развиваемой при этомъ силы пропорціональна мгновенному значенію силы тока и индуктируемому въ желѣзѣ магнетизму. Она, слѣдовательно, при незначительномъ насыщеніи желѣза пропорціональна квадрату силы тока, такъ что мы принципіально должны были бы имѣть одинаковую шкалу для постояннаго и перемѣннаго токовъ.

Но гистерезисъ желѣза является по своему дѣйствію размагнивающей силой, и поэтому вообще для полученія того же самаго отклоненія при перемѣнномъ токѣ необходимо большее число амперъ, чѣмъ при постоянномъ токѣ. Подобнаго рода приборы при примѣненіи перемѣннаго тока необходимо повѣрять тепловыми приборами или динамометрами, которые въ свою очередь повѣряются постояннымъ токомъ.

72. Діаграмма векторовъ.

Синусоида дастъ намъ наглядную картину распредѣленія электродвижущей силы и силы тока въ зависимости отъ времени, поэтому такою кривою мы будемъ часто пользоваться для большаго выясненія явленій,



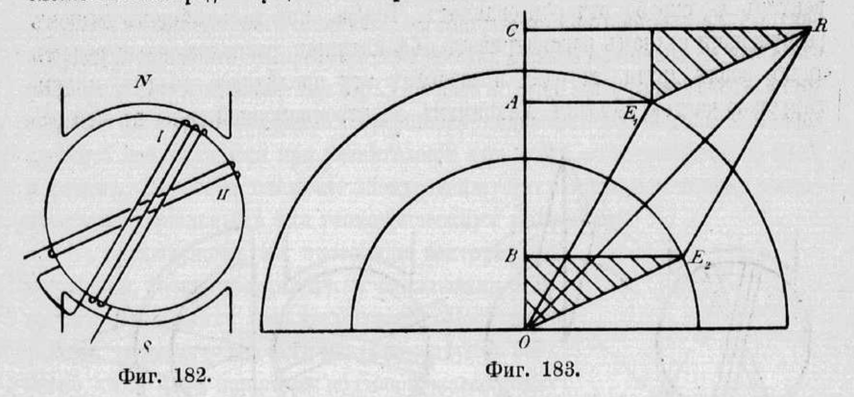
Фиг. 180. Фиг. 181.

происходящихъ въ цѣпи перемѣннаго тока. Но тамъ, гдѣ явится у насъ необходимость въ быстромъ заключеніи и численномъ опредѣленіи величинъ перемѣннаго тока, мы будемъ предпочитать діаграмму векторовъ. Въ этой діаграммѣ (фиг. 181) векторъ $OE = E_{max}$ вращается съ постоянной угловой скоростью $\omega = 2\pi$ ∽. Если у насъ имѣется двухполюсная машина, то векторъ вращается съ такою же скоростью, что и машина-двигатель. Направленіе вращенія произвольно и мы будемъ всегда принимать его по часовой стрѣлкѣ.

Въ нулевомъ положеніи векторъ совпадаетъ съ осью абсциссъ. Уголъ α, который образуетъ векторъ въ какой-либо моментъ съ осью абсциссъ, равенъ углу между плоскостью витка якоря на фиг. 180 и нулевымъ положеніемъ. Какъ видимъ, проэкція вектора на ось ординатъ OA равна $OE \cdot sin\alpha$, т. е. $E_{max} \cdot sin\alpha$. Мгновенное значеніе электродвижущей силы, слѣдовательно, въ каждой моментъ равно проэкціи вектора на ось ординатъ.

Ради большаго уясненія, на фиг. 181 показана еще связь между діаграммой векторовъ и синусоидой. Радіусъ круга, описаннаго изъ точки O, равенъ наибольшей ординатѣ синусоиды. Мгновенное значеніе OA на діаграммѣ векторовъ равновелико ординатѣ BD синусоиды. Наконецъ, дуга на діаграммѣ векторовъ, соотвѣтствующая углу α круга радіуса въ 1, равна абсциссѣ CD синусоиды.

Діаграмма векторовъ представляетъ собою очень удобное средство для сложенія электродвижущихъ силъ различной величины и различныхъ фазъ,



Фиг. 182. Фиг. 183.

т. е. различныхъ состояній по времени. Напримѣръ, на якорѣ машины фиг. 182 расположены двѣ послѣдовательно соединенныя обмотки, которыя состоятъ изъ неодинаковаго числа проволокъ и смѣщены относительно другъ друга на извѣстный опредѣленный уголъ. У катушки I большее число проволокъ, слѣдовательно, и наибольшая ея электродвижущая сила будетъ также больше, чѣмъ у катушки II. Описываемъ на фиг. 183 радіусами $OE_1 = E_{1max}$ и $OE_2 = E_{2max}$ два круга и проводимъ вектора OE_1 и OE_2 параллельно расположенію обмотокъ. Затѣмъ, по правилу параллелограмма силъ строимъ равнодѣйствующій векторъ OR обоихъ векторовъ. Тогда

AO мгновенное значеніе электродвижущей силы катушки I,
OB » » » » » II,
OC проэкція равнодѣйствующаго вектора на оси ординатъ.

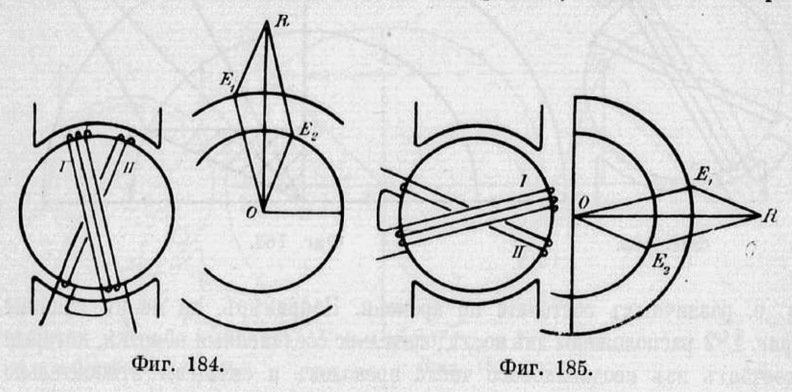
Изъ равенства заштрихованныхъ треугольниковъ получаемъ:

$$OC = OA + OB.$$

Но OC не что иное, какъ мгновенное значеніе электродвижущей силы, которая по величинѣ и по фазѣ опредѣляется векторомъ OR. Сумма мгно-

венныхъ значеній электродвижущихъ силъ обѣихъ катушекъ въ каждый моментъ равна мгновенному значенію равнодѣйствующей. Отсюда слѣдуетъ, что электродвижущія силы можно складывать, подобно механическимъ силамъ, по правилу параллелограмма.

Для бо̀льшаго еще выясненія послѣдняго положенія разсмотримъ тотъ моментъ, когда равнодѣйствующая электродвижущая сила достигаетъ своего наибольшаго значенія (фиг. 184). Ея векторъ при этомъ совпадаетъ съ осью ординатъ, въ то время, какъ векторъ E_1 располагается слѣва, а векторъ E_2 справа отъ оси ординатъ. Теперь, при дальнѣйшемъ нашемъ разсужденіи станемъ разсматривать обѣ катушки, расположенныя рядомъ другъ возлѣ друга, за одну и назовемъ эту послѣднюю общею индуктируемою частью обмотки. Максимумъ электродвижущей силы въ ней ра-



Фиг. 184. Фиг. 185.

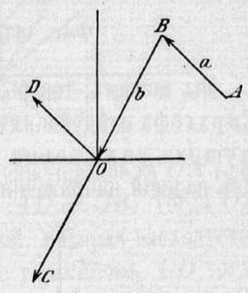
зовьется тогда, когда она будетъ находиться передъ серединой полюса. Тогда индуктируемая часть катушки I будетъ находиться почти передъ самой серединой полюса, а индуктируемая часть катушки II сейчасъ же за серединой полюса. Это тѣ же положенія, которыя мы получили и при помощи діаграммы векторовъ.

Далѣе разсмотримъ также случай, когда общая индуктирующая сторона обмотки располагается въ нейтральномъ поясѣ, и электродвижущая сила будетъ равна нулю (фиг. 185). При этомъ однѣ индуктируемыя части катушекъ находятся въ районѣ сѣвернаго полюса, а другія въ районѣ южнаго полюса, и электродвижущія силы, индуктируемыя передъ обоими полюсами, другъ друга уравновѣшиваютъ. Къ тому же результату мы приходимъ при помощи діаграммы векторовъ, гдѣ въ изображенный моментъ равнодѣйствующій векторъ совпадаетъ съ осью абсциссъ и гдѣ проэкція его на ось ординатъ равна нулю, при чемъ векторъ OE_1 располагается

надъ, а векторъ OE_2 подъ осью абсциссъ. Слѣдовательно, проэкція вектора OE_1 будетъ положительною, а проэкція вектора OE_2 отрицательною, а такъ какъ обѣ направлены одна противъ другой, то равнодѣйствующая равна нулю. Здѣсь опять направленія векторовъ соотвѣтствуютъ геометрическимъ положеніямъ катушекъ. Эти и подобнаго рода разсужденія устраняютъ затрудненія, которыя возникаютъ у начинающихъ изученіе перемѣннаго тока относительно того, что электродвижущія силы могутъ разниться по фазѣ и складываться по параллелограмму силъ.

Вмѣсто наибольшаго значенія въ діаграмму векторовъ вводятъ дѣйствующія значенія. При этомъ измѣняется только масштабъ, а углы всѣ остаются безъ измѣненія. Векторъ OR даетъ тогда какъ разъ дѣйствующее значеніе равнодѣйствующей. Совершенно подобнымъ же образомъ можно сложить получающіеся при развѣтвленіи два тока, отличающіеся по силѣ и фазамъ. Подобное сложеніе электродвижущихъ силъ или токовъ называютъ векторіальнымъ или геометрическимъ сложеніемъ.

Въ предыдущемъ мы проводили вектора изъ начальной точки координатъ и складывали ихъ затѣмъ по правилу параллелограмма. Поступать такимъ образомъ вначалѣ мы рекомендуемъ особенно, такъ какъ при этомъ подтверждается доказательство, данное на фиг. 183. Но останавливаться на такой неудобной по построенію діаграммѣ не слѣдуетъ и необходимо перейти къ болѣе простой, въ которой векторы не исходятъ изъ нулевой точки координатныхъ осей. Тогда вмѣсто параллелограмма мы получимъ треугольникъ и направленіе вектора въ случаѣ надобности будемъ указывать при помощи стрѣлки. При обозначеніи вектора необходимо строго держаться того правила, чтобы буквы слѣдовали по направленію вектора. Такъ, напримѣръ, векторъ a на фиг. 186 равнозначущъ съ векторомъ OD, называть же его мы должны не BA, а AB. Равнымъ образомъ, векторъ b равнозначущъ съ векторомъ OC, и называть его слѣдуетъ не OB, а BO.



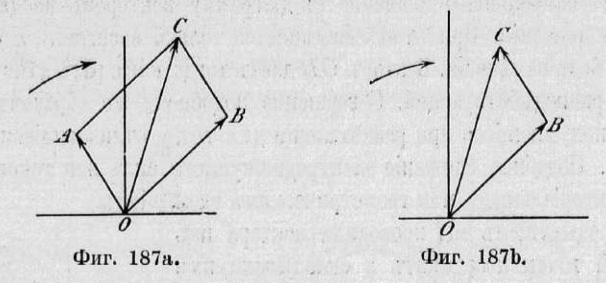
Фиг. 186.

Построеніе параллелограмма мы теперь можемъ очень удобно замѣнить построеніемъ треугольника. Для этого мы вмѣсто сложенія на фиг. 187a вектора OA съ векторомъ OB при помощи параллелограмма, приложимъ на фиг. 187b векторъ BC, равный по величинѣ и направленію вектору OA, къ вектору OB и получимъ ту же равнодѣйствующую OC, что и на фиг. 187a.

Сущность геометрическаго сложенія на фиг. 187b болѣе ясна, чѣмъ

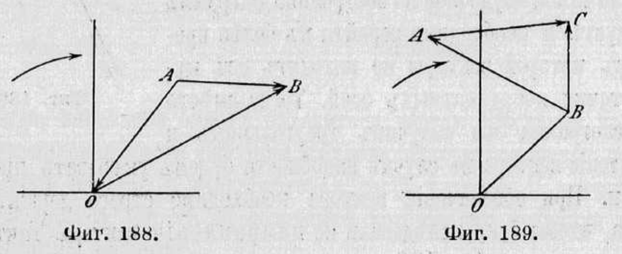
на фиг. 187a. Подобнымъ же образомъ на фиг. 188 по сложеніи векторовъ AO и OB получаемъ векторъ AB. Но направленіе идетъ отъ A къ B, такъ какъ при сложеніи начинаютъ въ точкѣ A и, идя далѣе постоянно по направленію стрѣлки отъ A черезъ O, приходятъ въ B.

Наконецъ, на фиг. 189 векторъ BA и векторъ AC даютъ результирующій векторъ BC. Рекомендуемъ всѣ вышеуказанные случаи повѣрить построеніемъ параллелограммовъ, для чего необходимо всѣ имѣющіеся векторы вычертить, начиная ихъ отъ начальной точки координатъ.



Фиг. 187a. Фиг. 187b.

Мы можемъ, теперь, для замкнутой цѣпи выразить 2-ое правило Кирхгофа слѣдующимъ образомъ: векторіальная сумма электродвижущихъ силъ равна векторіальной суммѣ паденій напряженія. Изъ паденій напряженія здѣсь имѣетъ мѣсто всегда омическое паденіе на-

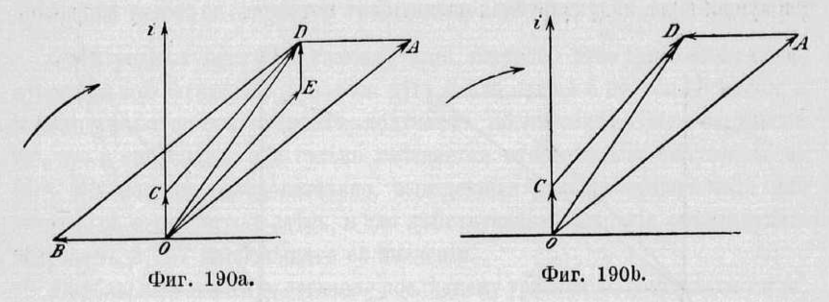


Фиг. 188. Фиг. 189.

пряженій $i \cdot w$. Послѣднее имѣетъ фазу, одинаковую съ токомъ. У генератора напряженіе у зажимовъ также, если его принимаютъ за напряженіе, доставляемое машиной, разсматриваютъ какъ (внѣшнее) паденіе напряженія. Оно имѣетъ одинаковую фазу съ электродвижущей силой машины. Положимъ, въ обмоткѣ якоря генератора индуктируется магнитнымъ потокомъ электродвижущая сила OA, а силовымъ потокомъ, создаваемымъ якоремъ, электродвижущая сила самоиндукціи OB. Первая изъ нихъ опережаетъ въ данномъ случаѣ токъ на 45°, а послѣдняя, какъ увидимъ въ слѣдующей статьѣ, отстаетъ на 90° отъ тока. Внутреннее

омическое паденіе напряженія пусть будетъ OC. Требуется опредѣлить напряженіе у зажимовъ по величинѣ и фазѣ.

Отложимъ для этого произвольно по направленію оси ординатъ векторъ тока (фиг. 190a). Съ опереженіемъ въ 45° проведемъ векторъ электродвижущей силы OA, и съ отставаніемъ на 90° векторъ самоиндукціи OB. Тогда результирующая OD будетъ полной электродвижущей силой. Послѣдняя затрачивается на внутреннюю потерю напряженія OC, которая совпадаетъ съ направленіемъ тока, и на доставляемое машиною напряженіе у зажимовъ. Послѣднее получается изъ построеннаго параллелограмма равнымъ по величинѣ и фазѣ OE. Фиг. 190b даетъ ту же діаграмму, но



Фиг. 190a. Фиг. 190b.

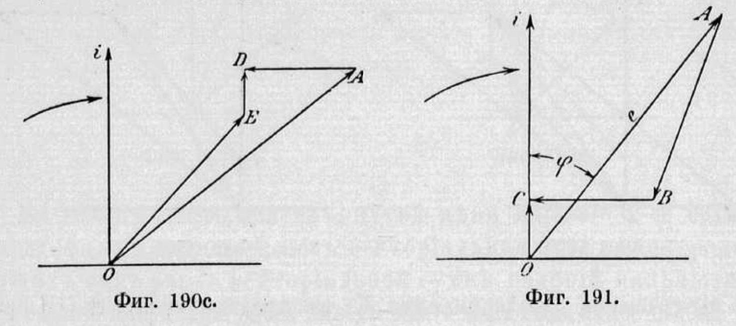
безъ вычерчиванія параллелограмма. Къ электродвижущей силѣ OA прибавляемъ геометрически электродвижущую силу $AD = OB$. Тогда OD является результирующей электродвижущей силой, которая расходуется на омическое паденіе напряженія OC и напряженіе у зажимовъ. CD тогда будетъ векторомъ напряженія у зажимовъ, доставляемаго машиной. Не трудно убѣдиться, что этотъ векторъ по своей величинѣ и фазѣ совпадаетъ съ векторомъ OE на фиг. 190a.

Пройдемъ теперь замкнутый многоугольникъ $OADCO$ на фиг. 190b по какому-нибудь направленію, положимъ, противъ часовой стрѣлки, мы увидимъ, что всѣ электродвижущія силы имѣютъ одно направленіе, въ нашемъ случаѣ противъ часовой стрѣлки, въ то время, какъ отдѣльные векторы паденія напряженія имѣютъ противоположное направленіе. Тогда, если знакъ Σ будетъ обозначать геометрическую сумму, то 2-е правило Кирхгофа будетъ: $\Sigma E - \Sigma i \cdot w = 0$.

Такъ какъ послѣдовательность, съ которою мы будемъ производить сложеніе, безразлична, то для однихъ и тѣхъ условій мы получаемъ различнаго вида діаграмму. Напримѣръ, на фиг. 190c мы къ электродвижущей силѣ OA прибавляемъ электродвижущую силу AD, создаваемую силовыми линіями, образуемыми якоремъ. Въ точкѣ D мы прилагаемъ век-

торъ ED омическаго паденія напряженія такимъ образомъ, что онъ по своему направленію противоположенъ общему теченію электродвижущихъ силъ на діаграммѣ. Тогда OE будетъ векторомъ напряженія у зажимовъ, создаваемаго машиной, по величинѣ и по фазѣ. Его направленіе, какъ и омическая потеря, противоположно общему теченію электродвижущихъ силъ на діаграммѣ.

Наоборотъ, если мы имѣемъ дѣло съ двигателемъ, то приложенное извнѣ напряженіе у зажимовъ $e = OA$ мы должны разсматривать какъ электродвижущую силу. На фиг. 191 послѣдняя опережаетъ токъ на уголъ φ. Подобно тому, какъ у двигателя постояннаго тока, и въ этомъ случаѣ электродвижущая сила, индуктируемая магнитнымъ потокомъ, по своему направле-



Фиг. 190c. Фиг. 191.

нію почти противоположна току. Векторъ электродвижущей силы изобразится прямою AB, къ ней присоединяется еще электродвижущая сила BC, индуктируемая силовымъ потокомъ якоря, которая отстаетъ отъ тока на 90°.

Сложеніе этихъ трехъ электродвижущихъ силъ даетъ результирующую OC, которая покрываетъ омическое паденіе напряженія и должна имѣть одинаковую фазу съ токомъ. И на этой діаграммѣ при слѣдованіи вдоль замкнутой фигуры электродвижущія силы направлены въ одномъ направленіи, а потери напряженія въ противоположномъ имъ.

73. Электродвижущая сила самоиндукціи.

Согласно ст. 32, самоиндукція равна:

$$E_s = -L\frac{di}{dt},$$

гдѣ

$$L = \frac{4\pi \cdot \xi^2 \cdot \mu \cdot Q}{l} \cdot 10^{-9}$$

представляетъ коэффиціентъ самоиндукціи въ генри. Пусть угловая скорость или дуга, откладываемая въ секунду, будетъ:

$$\omega = 2\pi \cdot \sim.$$

Тогда

$$i = i_{max} \cdot \sin\alpha = i_{max} \cdot \sin(\omega t).$$

Дифференцируя это выраженіе, получаемъ:

$$\frac{di}{dt} = i_{max} \cdot \cos(\omega t) \cdot \omega = i_{max} \cdot \omega \cdot \cos\alpha.$$

Подставляя это выраженіе въ уравненіе для E_s, получаемъ:

$$E_s = -L \cdot \omega \cdot i_{max} \cdot \cos\alpha.$$

Электродвижущая сила самоиндукціи, согласно этому, является косинусоидальной функціей, и, нанося дугу α или время t по оси абсциссъ, а самоиндукцію по оси ординатъ, получаемъ косинусоиду. Видъ ея таковъ же, что и синусоиды: она только смѣщается относительно синусоиды на 90°. Мы можемъ, слѣдовательно, выведенныя раньше соотношенія для синусоиды примѣнить и здѣсь, и для дѣйствующаго значенія самоиндукціи получаемъ 0,707 наибольшаго ея значенія.

Наибольшее значеніе, согласно послѣднему уравненію, достигается тогда, когда $\cos\alpha = -1$, $\alpha = 180°$. Оно равно:

$$E_{s\,max} = L \cdot \omega \cdot i_{max}.$$

Если умножимъ обѣ части этого равенства на 0,707 то получимъ въ обѣихъ частяхъ дѣйствующія значенія. Тогда дѣйствующая электродвижущая сила самоиндукціи будетъ:

$$E_s = L \cdot \omega \cdot i \qquad (47)$$

Опредѣлимъ теперь электродвижущую силу самоиндукціи у реакціонной катушки.

Реакціонная катушка, фиг. 194, состоитъ изъ желѣзнаго стержня, разрѣзаннаго въ одномъ мѣстѣ и обмотаннаго мѣдною проволокою. Когда индукція еще невелика, то магнитнымъ сопротивленіемъ пути въ желѣзѣ можно пренебречь, и при вычисленіи коэффиціента самоиндукціи принимать во вниманіе только воздухъ.

Пусть:

Длина пути въ воздухѣ . . . . $l = 0,6$ см.

Поперечное сѣченіе воздушнаго пути, перпендикулярное магнитному потоку . . . . $Q = 12$ кв. см.

Число витковъ . . . . $\xi = 200$,
Сила тока. . . . . $i = 10$ амп.
Число періодовъ . . . . $\backsim = 50$;

тогда, такъ какъ проницаемость воздуха равна 1, получаемъ:

$$L = \frac{4\pi \cdot \xi^2 \cdot \mu \cdot Q}{l} \cdot 10^{-9} = 12{,}5 \cdot \frac{200^2 \cdot 1 \cdot 12}{0{,}6} \cdot 10^{-9} = 0{,}01 \text{ генри.}$$

Далѣе:

$$\omega = 2\pi \backsim = 314.$$

Тогда электродвижущая сила самоиндукціи будетъ:

$$E_s = L \cdot \omega \cdot i = 0{,}01 \cdot 314 \cdot 10 = 31{,}4 \text{ вольта.}$$

Ниже мы увидимъ, что вольтметръ, присоединенный къ реакціонной катушкѣ, укажетъ почти точно это напряженіе въ 31,4 вольта, такимъ образомъ реакціонная катушка, подобно реостату, настолько понизитъ напряженіе.

Для расчета реакціонной катушки нужно вышевыведенной формулѣ, конечно, придать иной видъ, чтобы не придти при произвольномъ выборѣ поперечнаго сѣченія или числа витковъ къ неподходящей величинѣ магнитной индукціи въ желѣзѣ. Для этой цѣли мы введемъ въ предыдущую формулу магнитный потокъ N, который имѣетъ мѣсто при наибольшей силѣ тока

$$N = B_{max} \cdot Q,$$

такъ какъ мгновенное значеніе равно:

$$N \cdot \sin\alpha = N \cdot \sin(\omega t).$$

Приращеніе магнитнаго потока за время dt составитъ:

$$dN = N \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \cdot dt.$$

Это приращеніе, согласно уравненію (27) на стр. 78, необходимо умножить на $-\xi \cdot 10^{-8}$. Тогда мгновенное значеніе электродвижущей силы будетъ:

$$E = -N \cdot \omega \cdot \xi \cdot \cos\alpha \cdot 10^{-8}.$$

И наибольшое значеніе

$$N \cdot \omega \cdot \xi \cdot 10^{-8} = 2\pi \cdot N \cdot \backsim \cdot \xi \cdot 10^{-8}.$$

Дѣйствующее значеніе, которое составляетъ $\frac{1}{\sqrt{2}}$ наибольшаго значенія, будетъ:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \backsim \cdot \xi \cdot 10^{-8} = 4{,}44 \cdot N \cdot \backsim \cdot \xi \cdot 10^{-8} \quad . \; . \; (48)$$

Далѣе, согласно уравн. (31) и (32), мы имѣемъ слѣдующую зависимость:

$$B_{max} = \mu \cdot H_{max} = \frac{0{,}4\pi \cdot \xi \cdot i_{max} \cdot \mu}{l}.$$

Введемъ, теперь, въ это уравненіе дѣйствующую силу тока, т. е. подставимъ въ него $i_{max} = \sqrt{2} \cdot i$, и опредѣлимъ i; тогда получимъ:

$$i = \frac{B_{max} \cdot l}{1{,}78 \cdot \xi \cdot \mu} \cdot \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (49)$$

Это уравненіе будетъ имѣть особенно важное значеніе при опредѣленіи намагничивающаго тока трансформатора.

При помощи уравн. (48) и (49) можно разсчитать, теперь, реакціонную катушку, при условіи существованія въ ней пригодной максимальной магнитной индукціи. Положимъ, необходимо имѣть электродвижущую силу $E_s = 30$ вольтамъ при токѣ въ 10 амперъ и числѣ періодовъ $\backsim = 50$. Пусть индукція будетъ 5 000; при этомъ путемъ въ желѣзѣ пренебрежемъ и такимъ образомъ примемъ во вниманіе только путь черезъ воздухъ l. Поперечное сѣченіе желѣза пусть будетъ $Q = 15$ кв. сант.

Тогда:

$$N = B_{max} \cdot Q = 5\,000 \cdot 15 = 75\,000.$$

Изъ уравн. (49) получаемъ:

$$\xi = \frac{E_s \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot N \cdot \backsim} = \frac{30 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot 75\,000 \cdot 50} = 180.$$

Изъ уравн. же (49) получимъ размѣры воздушнаго промежутка:

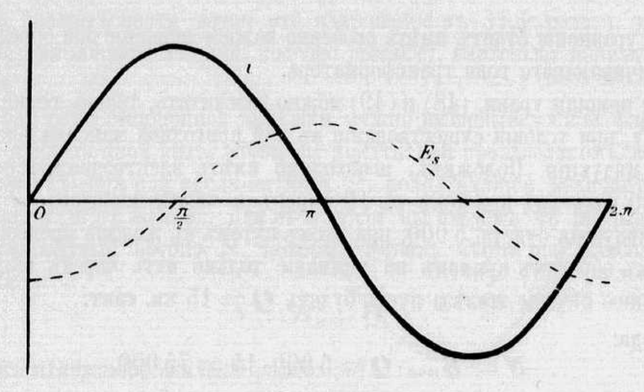
$$l = \frac{1{,}78 \cdot \xi \cdot \mu \cdot i}{B_{max}} = \frac{1{,}78 \cdot 180 \cdot 1 \cdot 10}{5\,000} = 0{,}64 \text{ см.}$$

При этомъ поперечное сѣченіе воздушнаго промежутка мы принимали равнымъ поперечному сѣченію желѣза. На самомъ же дѣлѣ поперечное сѣченіе воздушнаго слоя больше поперечнаго сѣченія желѣза, такъ какъ въ немъ создается очень полезное разсѣяніе магнитнаго потока, а во-вто-

рыхъ, благодаря бумажной изоляціи между желѣзными листами, возраститъ поперечное сѣченіе всей реакціонной катушки. Такимъ образомъ въ дѣйствительности катушка при 10 амперахъ будетъ поглощать немного болѣе 30 вольтъ.

Послѣ того какъ мы опредѣлили величину электродвижущей силы самоиндукціи, намъ остается еще установить ея фазу. Выше мы уже видѣли, что кривая самоиндукціи представляетъ собою косинусоиду и, какъ таковая, смѣщается по отношенію къ синусоидѣ тока на 90°. Это станетъ для насъ еще яснѣе, если мы опредѣлимъ для точекъ, соотвѣтствующихъ наиболѣе характернымъ моментамъ, отдѣльно величину и направленіе самоиндукціи.

Кривая тока на фиг. 192 очерчена жирно. При $\alpha = 0$, $sin\ \alpha = 0$ и $cos\ \alpha = 1$. Сила тока, слѣдовательно, равна нулю, а самоиндукція, согласно стр. 317, достигаетъ своего отрицательнаго максимума. Это особенно ясно



Фиг. 192.

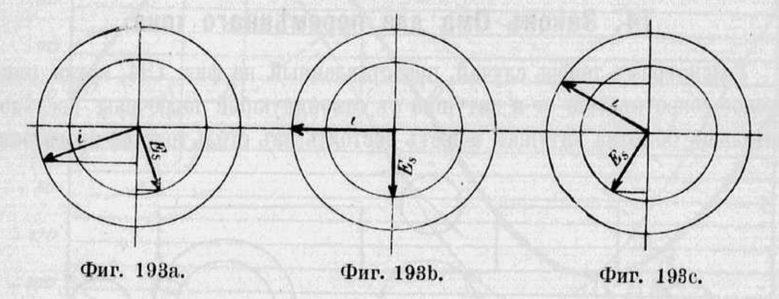
будетъ изъ того, что кривая силы тока въ этотъ моментъ поднимается наиболѣе круто вверхъ, и измѣненіе магнитнаго потока въ единицу времени будетъ наибольшимъ. Тотъ фактъ, что ордината самоиндукціи въ этотъ моментъ направлена внизъ, согласуется съ тѣмъ, что самоиндукція всегда одного направленія съ убывающимъ токомъ и противоположна возрастающему.

При $\alpha = 90°$ $sin\ \alpha = 1$ и $cos\ \alpha = 0$. Сила тока, слѣдовательно, наибольшая, а самоиндукція равна нулю. Въ этотъ моментъ кривая тока на фиг. 192 идетъ параллельна оси абсциссъ, и сила тока, а равнымъ образомъ и его магнитный потокъ въ теченіе небольшого промежутка времени не будетъ совершенно измѣняться. Слѣдовательно, въ этотъ моментъ пере-

сѣченіе магнитнаго потока и самоиндукція будутъ равны нулю, и вычерченная пунктиромъ кривая самоиндукціи пересѣкаетъ ось абсциссъ.

Подобнымъ образомъ можно построить различныя отдѣльныя точки кривой E_s, и тогда мы увидимъ, что кривая самоиндукціи отстаетъ отъ кривой тока на 90°. При этомъ, конечно, не слѣдуетъ при первомъ же бѣгломъ взглядѣ на фиг. 192 сейчасъ же выводить заключеніе, что кривая самоиндукціи опережаетъ кривую тока, ибо она на фигурѣ смѣщена нѣсколько впередъ вправо. Наоборотъ, мы должны заключить, что самоиндукція достигаетъ своего наибольшаго значенія тогда, когда сила тока уже прошла черезъ свой максимумъ. Самоиндукція, слѣдовательно, отстаетъ на четверть періода или на уголъ въ 90° отъ силы тока.

Діаграмма векторовъ, въ связи съ извѣстными уже намъ изъ ст. 32 законами самоиндукціи, разъяснитъ еще лучше намъ эти положенія. На



Фиг. 193a. Фиг. 193b. Фиг. 193c.

фиг. 193a, 193b, 193c, вычерчены діаграммы для различныхъ моментовъ. Если векторъ тока совпадаетъ съ осью абсциссъ фиг. 193b, то проэкція его на ось ординатъ, т. е. мгновенное значеніе силы тока, будетъ равна нулю. Въ этотъ моментъ самоиндукція имѣетъ свою наибольшую величину, ея векторъ, слѣдовательно, совпадаетъ съ осью ординатъ и будетъ направленъ внизъ, такъ какъ электродвижущая сила самоиндукціи отстаетъ отъ силы тока на 90°.

Далѣе, разсмотримъ соотношенія въ моменты, немного предшествующіе и немного послѣдующіе. На фиг. 193a токъ у насъ убывающій, и векторъ тока находится еще подъ осью абсциссъ, его проэкція, значитъ, въ этотъ моментъ имѣетъ такое направленіе, что и проэкція самоиндукціи. Самоиндукція, слѣдовательно, одного направленія съ убывающимъ токомъ, какъ это требуется согласно ст. 32.

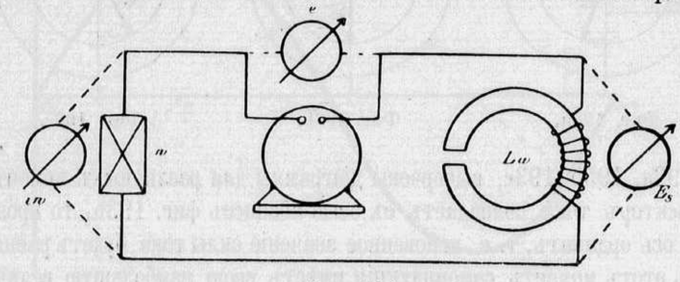
На фиг. 193c токъ прошелъ уже нулевое положеніе, мы имѣемъ, слѣдовательно, теперь возрастающій токъ. Проэкція его вектора совпадаетъ съ положительнымъ направленіемъ оси ординатъ, тогда какъ проэкція век-

тора самоиндукціи—съ отрицательнымъ направленіемъ оси. Самоиндукція, слѣдовательно, на діаграммѣ векторовъ дѣйствуетъ противъ возрастающаго тока, что, конечно, согласуется съ ст. 32.

Если, теперь, мы примемъ, что магнитный потокъ будетъ постоянно откладываться въ томъ же направленіи, что и токъ, его создающій, то между намагничивающимъ токомъ и создаваемымъ имъ магнитнымъ потокомъ не будетъ существовать никакой разности фазъ. Кривая тока на фиг. 192 даетъ намъ тогда непосредственно въ соотвѣтствующемъ масштабѣ кривую магнитнаго потока, проходящаго сквозь поверхности витковъ. Слѣдовательно, индуктируемая электродвижущая сила отстаетъ на 90° не только отъ тока, но на тѣ же 90°—и отъ магнитнаго потока, благодаря измѣненію котораго она создается.

74. Законъ Ома для перемѣннаго тока.

Разсмотримъ теперь случай, представленный на фиг. 194, когда омическое сопротивленіе w и катушка съ самоиндукціей включены послѣдовательно. Обмотка катушки можетъ состоять изъ столь толстой проволоки,

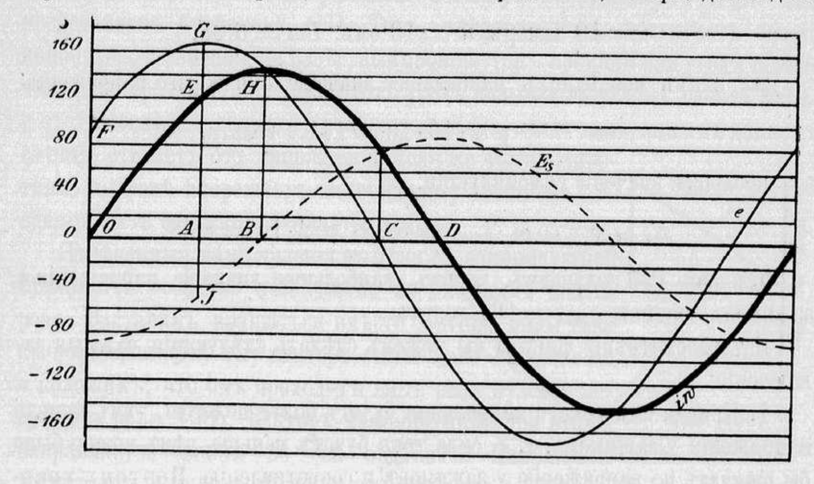


Фиг. 194.

что сопротивленіемъ ея можно пренебречь. Спрашивается теперь: какая сила тока будетъ въ сопротивленіи w при напряженіи у зажимовъ машины e и самоиндукціи E_s и какова фаза силы тока по сравненію съ напряженіемъ у зажимовъ машины. Предварительно измѣнимъ нѣсколько нашу задачу на слѣдующую: каково должно быть напряженіе у зажимовъ, чтобы пропустить сквозь внѣшнюю цѣпь токъ опредѣленной силы? Дать отвѣтъ на этотъ вопросъ проще всего при помощи векторной діаграммы, но лучше все же предпослать таковой изображеніе синусоиды. Опредѣлимъ сначала мгновенное значеніе омической потери напряженія, умножая для этого мгновенное значеніе силы тока на сопротивленіе.

Омическое напряженіе нанесемъ, затѣмъ, по оси ординатъ и получимъ кривую iw, очерченную жирно на фиг. 195. Такъ какъ омическая потеря напряженія достигаетъ своего наибольшаго значенія въ тотъ моментъ, когда и сила тока будетъ наибольшею, то фаза ея будетъ одинакова съ фазой тока. Слѣдовательно, кривая $i \cdot w$ отличается отъ кривой тока только своимъ масштабомъ.

Это омическое напряженіе создается, съ одной стороны, напряженіемъ у машины e, а съ другой стороны электродвижущей силою E_s, кривая которой отстаетъ отъ кривой $i \cdot w$ на 90°. Опредѣлимъ, теперь, для отдѣль-



Фиг. 195.

ныхъ точекъ, соотвѣтствующихъ особенно характернымъ моментамъ, величины напряженія у зажимовъ.

Въ точкѣ O сила тока равна 0, хотя въ это время будетъ дѣйствовать электродвижущая сила самоиндукціи, которая какъ разъ въ этотъ моментъ достигаетъ даже своего наибольшаго отрицательнаго значенія. Ея дѣйствіе, слѣдовательно, должно уравновѣситься непосредственно OF, мгновеннымъ значеніемъ напряженія у зажимовъ, направленнымъ въ противоположную сторону, такъ какъ только при уравновѣшиваніи давленія противодавленіемъ сила тока можетъ равняться нулю.

Въ точкѣ A доставляется омическое напряженіе EA, въ то время какъ электродвижущая сила самоиндукціи равна JA. Для преодолѣнія ихъ обѣихъ необходимо напряженіе у зажимовъ GA, такъ какъ послѣднее, будучи приложено къ JA, если принять во вниманіе знакъ у JA, даетъ напряженіе EA.

Въ точкѣ B самоиндукція равна 0, и напряженіе у зажимовъ должно доставить только омическое напряженіе HB. Кривыя напряженія у зажимовъ и омическаго напряженія, слѣдовательно, пересѣкутся въ точкѣ H.

Наконецъ, въ точкѣ C омическое напряженіе равно электродвижущей силѣ самоиндукціи, такимъ образомъ этой послѣдней какимъ образомъ разъ хватаетъ для проведенія тока черезъ сопротивленіе. Слѣдовательно, необходимое напряженіе у зажимовъ въ этотъ моментъ будетъ равно нулю и кривая e пересѣкаетъ ось абсциссъ въ точкѣ C. Подобнымъ образомъ построена на фиг. 195 слабо обведенная кривая напряженія у зажимовъ, для значеній:

$$i = 10 \text{ амперъ}, \; w = 10 \text{ омъ}, \; L\omega = 6{,}28.$$

Для этихъ послѣднихъ наибольшее значеніе омическаго напряженія:

$$i_{max} \cdot w = \sqrt{2} \cdot 10 \cdot 10 = 141{,}4 \text{ вольта},$$

а наибольшее значеніе самоиндукціи:

$$E_{s\ max} = L \cdot \omega \cdot i_{max} = 6{,}28 \cdot \sqrt{2} \cdot 10 = 88{,}8.$$

Изъ фиг. 195 получаемъ, затѣмъ, наибольшее значеніе напряженія у зажимовъ машины $e_{max} = 167$ вольтъ.

Изъ разсмотрѣнія фигуры мы можемъ сдѣлать слѣдующія важныя заключенія:

1. Кривая омическаго напряженія будетъ болѣе пологою, чѣмъ кривая напряженія у зажимовъ, т. е. сила тока будетъ меньше, чѣмъ можно было бы ожидать по напряженію у зажимовъ и сопротивленію. Поэтому уравненіе $e = i \cdot w$ непригодно для цѣпи перемѣннаго тока съ самоиндукціей.

2. Сумма наибольшихъ значеній омическаго напряженія и самоиндукціи больше наибольшаго значенія напряженія у зажимовъ. Сложимъ наибольшія значенія омическаго напряженія и самоиндукціи, получимъ въ суммѣ 230,2 вольта; тогда какъ наибольшее значеніе напряженія у зажимовъ изъ чертежа получается равнымъ приблизительно 167 вольтамъ. Этотъ фактъ станетъ особенно замѣтнымъ, если положимъ, какъ на фиг. 194, что у омическаго сопротивленія, у реакціонной катушки и у зажимовъ машины включены вольтметры. Тогда на приборахъ мы прочтемъ слѣдующія значенія дѣйствующихъ напряженій:

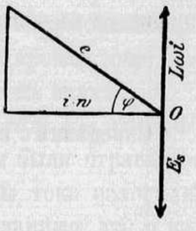
$$e = \frac{e_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{167}{\sqrt{2}} = 118,$$

$$i \cdot w = 10 \cdot 10 = 100,$$

$$E_s = L\omega \cdot i = 6{,}28 \cdot 10 = 62{,}8.$$

Слѣдовательно, сумма составляющихъ напряженій $i \cdot w$ и E_s больше полнаго напряженія e. Этотъ результатъ какъ бы совершенно противорѣчитъ тѣмъ воззрѣніямъ, къ которымъ мы уже привыкли при изученіи постояннаго тока. Но нужно указать на то, что все это относится только къ дѣйствующимъ значеніямъ. Для мгновенныхъ же значеній сохраняетъ свою силу правило Кирхгофа, согласно которому полное напряженіе равно алгебраической суммѣ отдѣльныхъ напряженій.

3. Кривая омическаго напряженія или силы тока отстанетъ отъ кривой напряженія у зажимовъ на уголъ φ, который на фиг. 195 представленъ отрѣзкомъ CD. Токъ, слѣдовательно, достигаетъ своего наибольшаго значенія на извѣстный промежутокъ времени или уголъ позже чѣмъ электродвижущая сила. Этотъ уголъ называютъ угломъ сдвига фазъ, и этотъ послѣдній считаютъ положительнымъ, когда токъ, какъ въ данномъ случаѣ, отстаетъ отъ напряженія. Если же токъ, напротивъ, по фазѣ опережаетъ напряженія у зажимовъ, то сдвигъ фазъ считаютъ отрицательнымъ.



Фиг. 196.

Замѣченныя нами явленія въ цѣпи съ самоиндукціей становятся особенно очевидными на діаграммѣ векторовъ. Заставимъ вращаться вмѣсто вектора силы тока пропорціональный ему векторъ омическаго напряженія и положимъ, что онъ проходитъ какъ разъ нулевое положеніе (фиг. 196). Векторъ самоиндукціи при этомъ направляется внизъ по оси ординатъ. Напряженіе у зажимовъ e имѣетъ тогда такую величину и фазу, что съ электродвижущей силой E_s даетъ результирующую $i \cdot w$.

Вмѣсто этого мы можемъ иначе разсматривать это явленіе. Если въ этотъ моментъ сила тока равна нулю, то самоиндукція должна уравновѣситься направленной въ противоположную сторону слагающей напряженія у зажимовъ. Обозначимъ эту слагающую черезъ $L\omega . i$ и отложимъ ее вверхъ отъ точки O по положительной оси ординатъ. Изъ напряженій $L\omega . i$ и $i \cdot w$ получается равнодѣйствующая e, какъ гипотенуза прямоугольнаго треугольника, катетами котораго будутъ индуктивная потеря напряженія и омическое напряженіе. Тогда имѣемъ, что векторъ индуктивной потери напряженія $L\omega \cdot i$ опережаетъ токъ на 90°.

Напряженію у зажимовъ, поэтому, предстоитъ двоякая задача: преодолѣть омическое сопротивленіе и уравновѣсить противодѣйствующую электродвижущую силу самоиндукціи. Хотя самоиндукція бываетъ порою направлена одинаково съ токомъ, а порою противъ тока, мы все же считаемъ ее вообще за противодѣйствующее напряженіе, которое должно компенсиро-

ваться слагающей напряженія у зажимовъ. Это становится особенно яснымъ на изображенномъ на фигурѣ случаѣ, гдѣ все мгновенное значеніе напряженія у зажимовъ затрачивается на то, чтобы уравновѣсить электродвижущую силу самоиндукціи.

Здѣсь мы опять замѣчаемъ тѣ особенности, на которыя мы уже указывали выше. Напряженіе у зажимовъ e больше омическаго напряженія $i \cdot w$, и кромѣ того алгебраическая сумма дѣйствующихъ слагающихъ напряженій $i \cdot w$ и $L\omega \cdot i$ больше полнаго напряженія e. Далѣе, сила тока здѣсь также отстаетъ на уголъ φ, указанный на фигурѣ, отъ напряженія у зажимовъ машины. При этомъ слѣдуетъ замѣтить, что уголъ сдвига фазъ φ образуется постоянно гипотенузой и омическимъ катетомъ прямоугольнаго треугольника напряженій.

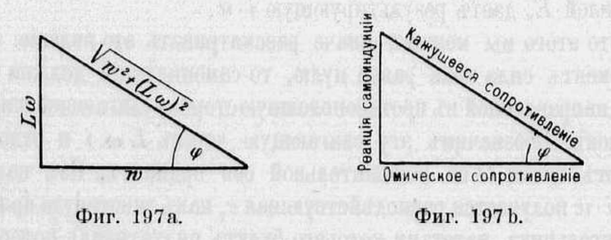
Перейдемъ теперь, пользуясь діаграммой векторовъ, къ установленію соотношеній между численными значеніями разсмотрѣнныхъ величинъ, принимая во вниманіе самоиндукцію. Изъ фиг. 196 имѣемъ:

$$e^2 = (i \cdot w)^2 + (L\omega \cdot i)^2.$$

Опредѣлимъ изъ этого уравненія i; тогда получимъ:

$$i = \frac{e}{\sqrt{w^2 + (L\omega)^2}} \quad \ldots \ldots \ldots (50)$$

Это уравненіе называютъ закономъ Ома для перемѣннаго тока. Оно наиболѣе ясно указываетъ на то, что самоиндукція увеличиваетъ сопротивленіе, такъ какъ вмѣсто простого сопротивленія w въ знаменатель входитъ теперь величина $\sqrt{w^2 + (L\omega)^2}$.



Фиг. 197a. Фиг. 197b.

Графически увеличивающееся сопротивленіе представляется гипотенузой прямоугольнаго треугольника, катетами котораго являются омическое сопротивленіе w и величина $L\omega$ (діаграмма Флеминга). Такъ какъ этотъ прямоугольный треугольникъ (фиг. 197a) подобенъ соотвѣтствующему треугольнику напряженія, то уголъ между гипотенузой и омическимъ катетомъ будетъ равенъ углу сдвига фазъ φ, и получаемъ соотношеніе:

$$tg\varphi = \frac{L\omega}{w} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (51)$$

Величину $\sqrt{w^2 + (L\omega)^2}$ называютъ **кажущимся сопротивленіемъ** (Impedanz), а величину $L\omega$ — **реакціей самоиндукціи или индуктивнымъ сопротивленіемъ** (Induktanz) [1] (Фиг. 197b). Дать подобное наименованіе имѣли право, понятно, лишь только потому, что $L\omega$ имѣетъ измѣреніе электрическаго сопротивленія. Въ самомъ дѣлѣ, вѣдь измѣреніемъ коэффиціента самоиндукціи является длина, а измѣреніемъ угловой скорости—обратная величина времени; отсюда

измѣреніе реакціи самоиндукціи: $L \cdot T^{-1}$.

Но это же самое, согласно ст. 40, является и измѣреніемъ скорости или электрическаго сопротивленія. Такъ какъ генри равенъ 10^9 абсолютныхъ единицъ и омъ равенъ также 10^9 абсолютныхъ единицъ, то произведеніе $L\omega$ даетъ намъ сопротивленіе самоиндукціи непосредственно въ омахъ.

Помощью уравн. (40) мы можемъ теперь, зная e, w и $L\omega$, опредѣлить силу тока, въ то время, какъ прежде мы должны были ограничиваться только тѣмъ, что, наоборотъ, для заданной силы тока находили необходимое напряженіе у зажимовъ. Возьмемъ тѣ же данныя, что и въ началѣ этой статьи, см. стр. 324, т. е.:

$$e = 118, \qquad w = 10, \qquad L\omega = 6{,}28;$$

тогда изъ уравн. (40)

$$i = \frac{118}{\sqrt{10^2 + 6{,}28^2}} = 10 \text{ амперъ}.$$

Сдвигъ фазъ при этомъ между напряженіемъ у зажимовъ и силою тока опредѣлится изъ уравненія:

$$tg\varphi = \frac{L\omega}{w} = \frac{6{,}28}{10} = 0{,}628.$$

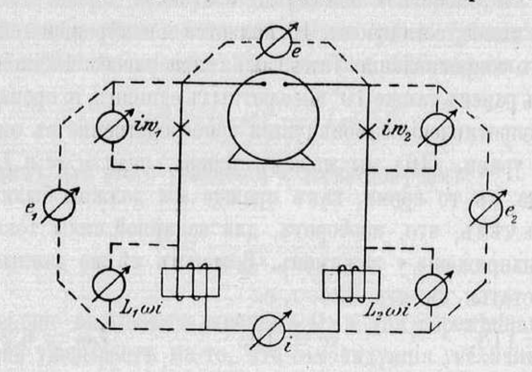
Этому тангенсу соотвѣтствуетъ уголъ около $32°10'$ или дуга $\frac{\pi}{6}$. Изъ фиг. 195 видно, что этой дугѣ соотвѣтствуетъ длина CD.

---

[1] Авторъ различаетъ омическое сопротивленіе и индуктивное сопротивленіе, съ чѣмъ мы не можемъ вполнѣ согласиться, такъ какъ подъ индуктивнымъ сопротивленіемъ слѣдуетъ понимать сопротивленіе, обладающее не только самоиндукціей, но и омическимъ сопротивленіемъ. Ред.

75. Послѣдовательное соединенiе омическаго и индуктивнаго сопротивленiй.

Разсмотримъ теперь случай, когда (фиг. 198) двѣ вѣтви цѣпи, обладающiя обѣ омическимъ сопротивленiемъ и самоиндукцiей, включены послѣдовательно. Въ этомъ случаѣ полное напряженiе e будетъ гипотенузой прямоугольнаго треугольника, однимъ катетомъ котораго будетъ сумма омическихъ напряженiй $i \cdot w_1$ и $i \cdot w_2$, а другимъ сумма индуктивныхъ сопротивленiй $L_1 \omega \cdot i$ и $L_2 \omega \cdot i$ (фиг. 198). Въ то же время это полное напряженiе, съ другой стороны, является геометрическою суммою напряженiй у зажимовъ e_1 и e_2 обѣихъ вѣтвей тока. Тогда для каждой отдѣльной вѣтви получаются характеристическiе треугольники напряженiя. Напряже-



Фиг. 198.

нiе у зажимовъ e_1 лѣвой части цѣпи будетъ гипотенузой при катетахъ $i \cdot w_1$ и $L_1 \omega \cdot i$. Оно образуетъ съ векторомъ силы тока уголъ φ_1, тангенсъ котораго опредѣляется уравненiемъ:

$$tg\, \varphi_1 = \frac{L_1 \cdot \omega}{w_1}.$$

Подобно этому, напряженiе у зажимовъ e_2 правой части цѣпи будетъ гипотенузой при катетахъ $i \cdot w_2$ и $L_2 \omega \cdot i$. Оно образуетъ съ векторомъ силы тока уголъ φ_2, тангенсъ котораго опредѣляется уравненiемъ:

$$tg\, \varphi_2 = \frac{L_2 \cdot \omega}{w_2}.$$

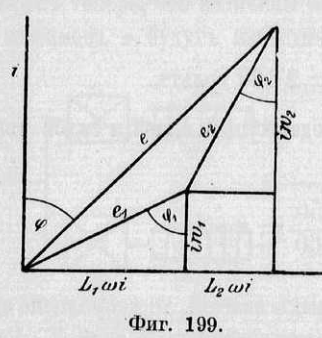
Уголъ сдвига фазъ φ всей цѣпи тока по своей величинѣ лежитъ между угломъ φ_1 и φ_2. Такимъ образомъ въ то время, какъ фаза тока во всѣхъ

частяхъ неразвѣтвленной цѣпи будетъ постоянною, напряженiя отдѣльныхъ составляющихъ вѣтвей этой цѣпи будутъ различны по фазѣ (фиг. 199).

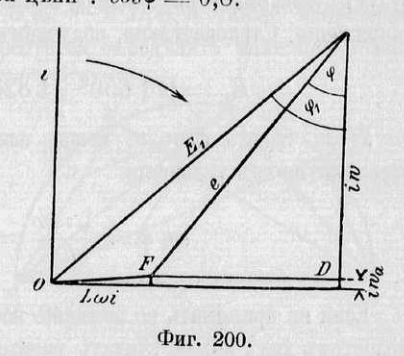
Подобное мы будемъ имѣть, когда генераторъ будетъ доставлять токъ во внѣшнюю цѣпь, обладающую омическимъ сопротивленiемъ и самоиндукцiей.

Положимъ, у машины перемѣннаго тока:

напряженiе у зажимовъ	$e = 2\,000$ вольтъ,
сила тока	$i = 50$ амперъ,
сопротивленiе якоря	$w_a = 1$ омъ,
коэффицiентъ самоиндукцiи якоря . . .	$L = 0{,}04$ генри,
число перiодовъ	$\sim = 50$,
уголъ сдвига фазъ во внѣшней цѣпи .	$cos\varphi = 0{,}8$.



Фиг. 199.



Фиг. 200.

Требуется опредѣлить потерю напряженiя въ машинѣ, а также величину и фазу необходимой электродвижущей силы. Для построенiя дiаграммы (фиг. 200) у насъ тогда имѣются слѣдующiя величины:

$$i \cdot w_a = 50 \cdot 1 = 50 \text{ вольтъ.}$$

$$L\omega \cdot i = 0{,}04 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 50 = 628 \text{ вольтъ.}$$

Изъ этихъ двухъ величинъ получается внутренняя потеря напряженiя OF, какъ гипотенуза прямоугольнаго треугольника, катетами котораго являются омическая потеря напряженiя въ машинѣ и внутренняя индуктивная потеря напряженiя. Тогда получаемъ:

$$OF = \sqrt{50^2 + 628^2} = 630 \text{ вольтъ.}$$

Далѣе, опредѣлимъ внѣшнюю омическую потерю $i \cdot w$ и получимъ:

$$i \cdot w = e \cdot cos\varphi = 2\,000 \cdot 0{,}8 = 1\,600 \text{ вольтъ.}$$

Величинѣ $cos\varphi = 0{,}8$ соотвѣтствуетъ $sin\varphi = 0{,}6$. Тогда внѣшняя индуктивная потеря напряженія будетъ:

$$FD = e \cdot sin\varphi = 2\,000 \cdot 0{,}6 = 1\,200 \text{ вольтъ.}$$

Сумма омическихъ потерь напряженій во всей цѣпи тогда будетъ:

$$i \cdot w_a + i \cdot w = 50 + 1600 = 1\,650 \text{ вольтъ,}$$

а сумма индуктивныхъ потерь напряженія:

$$FD + L\omega i = 1\,200 + 628 = 1\,828 \text{ вольтъ.}$$

Изъ этихъ двухъ величинъ получается электродвижущая сила E_1 машины, какъ гипотенуза прямоугольнаго треугольника, катетами котораго будутъ сумма омическихъ потерь напряженія и сумма индуктивныхъ потерь напряженія. Слѣдовательно, получаемъ:

$$E_1 = \sqrt{1\,650^2 + 1\,828^2} = 2\,460 \text{ вольтъ.}$$

Уголъ сдвига фазъ φ_1 между электродвижущей силой и силой тока опредѣлится изъ уравненія:

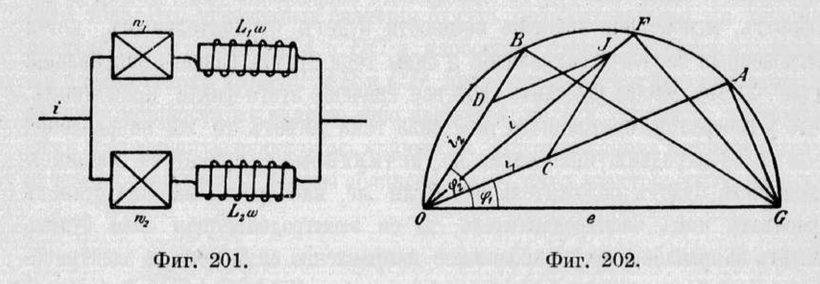
$$cos\,\varphi = \frac{\Sigma\, i \cdot w}{E_1} = \frac{1\,650}{2\,460} = 0{,}67.$$

Если не принимать во вниманіе побочныхъ явленій, то напряженіе при холостомъ ходѣ можно считать равнымъ электродвижущей силѣ E_1. Разность между напряженіемъ при холостомъ ходѣ и рабочимъ напряженіемъ составитъ, слѣдовательно, $2460 - 2000 = 460$ вольтъ, въ то время, какъ полная потеря напряженія въ якорѣ $OF = 630$ вольтъ. Это кажущееся противорѣчіе объясняется тѣмъ, что для полученія напряженія у зажимовъ e векторъ OF на фигурѣ 200 долженъ вычитаться изъ электродвижущей силы не алгебраически, а геометрически, чтобы получить напряженіе у зажимовъ E.

Вышеуказанное паденіе напряженія въ 460 вольтъ между холостымъ ходомъ и полной нагрузкой составляетъ $18{,}6\%$ напряженія при холостомъ ходѣ. Такъ какъ оно большею своею частью должно быть отнесено къ внутренней самоиндукціи, то теперь ясно, какое вредное воздѣйствіе имѣетъ увеличеніе сопротивленія, возникающее вслѣдствіе явленій самоиндукціи.

76. Параллельное соединеніе омическихъ и индуктивныхъ сопротивленій.

Въ случаѣ, представленномъ на фиг. 201, двѣ вѣтви тока, обладающія омическимъ и индуктивнымъ сопротивленіями, соединены параллельно. Напряженіе у зажимовъ e здѣсь у обѣихъ вѣтвей будетъ одинаково по величинѣ и по фазѣ. Понятно, что при этомъ совершенно безразлично, находится ли въ каждой вѣтви цѣпи одинъ единственный пріемникъ электрической энергіи, обладающій омическимъ и индуктивнымъ сопротивленіями, или, какъ на фиг. 201, въ каждой вѣтви будутъ включены послѣдовательно омическое и индуктивное сопротивленія. Положимъ теперь, что величины w_1 и $L_1\omega$, w_2 и $L_2\omega$, а также напряженіе у зажимовъ e будутъ извѣстны, требуется опредѣлить величину и фазу



Фиг. 201. Фиг. 202.

силы тока въ развѣтвленіи. Для этой цѣли на напряженіи у зажимовъ e построимъ (фиг. 202), какъ на діаметрѣ, полуокружность, и проведемъ векторъ OA такъ, чтобы онъ образовалъ съ діаметромъ уголъ φ_1, Уголъ φ_1 при этомъ опредѣляется изъ уравненія:

$$tg\,\varphi_1 = \frac{L_1\omega}{w_1}.$$

Тогда векторъ OA дастъ намъ омическую потерю напряженія въ первой вѣтви. Раздѣлимъ его на сопротивленіе w_1, получимъ силу тока i_1, которая на фигурѣ выразится, положимъ, отрѣзкомъ OC. Затѣмъ проведемъ векторъ OB такимъ образомъ, чтобы онъ съ діаметромъ образовалъ уголъ φ_2. Уголъ φ_2 при этомъ опредѣляется уравненіемъ:

$$tg\,\varphi_2 = \frac{L_2\omega}{w_2}.$$

Тогда векторъ OB представитъ намъ омическую потерю напряженія во второй вѣтви цѣпи. Раздѣлимъ его на сопротивленіе w_2, получимъ силу тока i_2, которая изобразится, положимъ, длиною OD. Равнодѣйствующая OJ изъ i_1 и i_2 представитъ намъ тогда по величинѣ и по фазѣ полную силу тока i. Продолжимъ векторъ i до пересѣченія въ точкѣ F съ дугой полуокружности. Тогда векторъ OF — омическая потеря напряженія, а хорда FG— индуктивная потеря напряженія одного единственнаго пріемника, который эквивалентенъ всей нашей развѣтвленной цѣпи. Сила тока i при этомъ отстаетъ отъ напряженія у зажимовъ на уголъ FOG.

77. Мощность перемѣннаго тока при сдвигѣ фазъ.

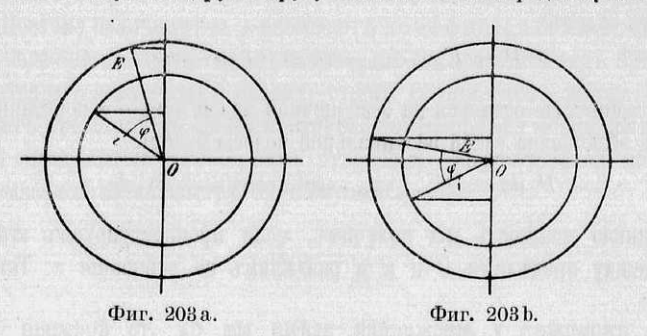
При сдвигѣ фазъ между напряженіемъ и силою тока мгновенное значеніе мощности будетъ положительнымъ, когда мгновенныя значенія напряженія и силы тока будутъ одинаковаго направленія (фиг. 203а), и, наоборотъ, мгновенное значеніе мощности будетъ отрицательнымъ, когда мгновенныя значенія напряженія и силы тока будутъ разнаго направленія (фиг. 203b). Чтобы выяснить себѣ все значеніе этого факта, припомнимъ, что у генератора постояннаго тока сила тока имѣетъ то же направленіе, что и электродвижущая сила, и доставляемая при этомъ машиною мощность будетъ положительною. Если же, наоборотъ, машина станетъ работать какъ электродвитатель, то ея электродвижущая сила будетъ имѣть направленіе противоположное направленію силы тока, и электрическая мощность машины будетъ отрицательною. Слѣдовательно, мы приходимъ къ тому заключенію, что генераторъ перемѣннаго тока, у котораго фаза тока смѣщена по отношенію къ фазѣ электродвижущей силы, работаетъ только по временамъ въ качествѣ генератора, а по временамъ самъ заимствуетъ энергію изъ сѣти и работаетъ какъ электродвигатель.

Подобныя же явленія происходятъ и въ пріемникахъ электрической энергіи. Мощность, сообщаемая этимъ послѣднимъ, будетъ положительною, пока мгновенныя значенія напряженій у зажимовъ и силы тока будутъ одинаковаго направленія. Когда же напряженіе у зажимовъ и сила тока будутъ противоположнаго другъ другу направленія, тогда энергія, сообщаемая пріемнику, будетъ отрицательною. Пріемникъ въ теченіе этого промежутка времени будетъ доставлять обратно энергію въ сѣть и работаетъ при этомъ какъ генераторъ.

Фиг. 204 относится къ генератору, сила тока котораго i, вслѣдствіе самоиндукціи въ самой машинѣ и во внѣшней цѣпи, отстаетъ отъ электродвижущей силы на уголъ φ, который соотвѣтствуетъ при этомъ дугѣ AB.

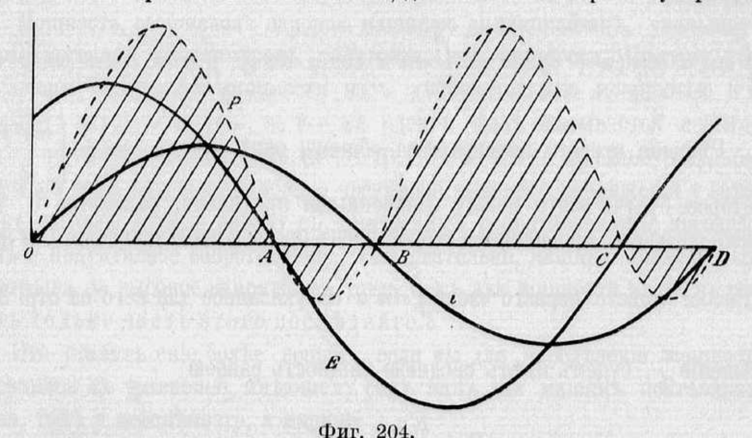
Время нанесено по оси абсциссъ, а сила тока, или соотвѣтствующая электродвижущая сила, по оси ординатъ.

Опредѣлимъ, теперь, мгновенныя значенія мощности P, перемножая для этого соотвѣтствующія другъ другу величины электродвижущей силы и



Фиг. 203а. Фиг. 203b.

силы тока. Эти мгновенныя значенія будутъ положительными въ теченіе промежутковъ времени OA и BC и, наоборотъ, отрицательными въ теченіе промежутковъ времени AB и CD. Если отложимъ затѣмъ мгновенныя значенія мощности въ какомъ-либо масштабѣ по оси ординатъ, то получимъ обозначенную пунктиромъ кривую P. Заштрихованная площадь, ограниченная этой кривой и осью абсциссъ, дастъ намъ электрическую работу,



Фиг. 204.

доставляемую машиной. Эта площадь располагается отчасти надъ осью абсциссъ, отчасти подъ этой послѣдней. Среднюю мощность мы получимъ, раздѣливъ разность между верхними и нижними площадями на время. Изъ этого тотчасъ же вытекаетъ, что мощность должна быть меньше, чѣмъ можно было бы ожидать по электродвижущей силѣ и силѣ тока.

Для опредѣленія средней мощности положимъ, что вмѣсто времени снова, какъ это уже дѣлали раньше, нанесены дуги α. Если, теперь, въ какой-либо моментъ времени сила тока равна $i_{max} \cdot sin\ \alpha$, то электродвижущая сила въ тотъ же моментъ будетъ равна $E_{max} \cdot sin\ (\alpha + \varphi)$, и мгновенная мощность будетъ:

$$P = E_{max} \cdot i_{max} \cdot sin\ \alpha \cdot sin\ (\alpha + \varphi).$$

Эта мощность остается на безконечной малой дугѣ $d\,\alpha$ постоянною, и площадь безконечно узкой вертикальной полосы будетъ:

$$P \cdot d\alpha = E_{max} \cdot i_{max} \cdot sin\ \alpha \cdot sin(\alpha + \varphi) \cdot d\alpha.$$

Среднюю мощность мы получимъ, если проинтегрируемъ это уравненіе между предѣлами 0 и π и раздѣлимъ на основаніе π. Тогда получимъ:

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi E_{max} \cdot i_{max} \cdot sin\ \alpha \cdot sin\ (\alpha + \varphi) \cdot d\alpha.$$

Подставляя затѣмъ:

$$sin\ (\alpha + \varphi) = sin\ \alpha \cdot cos\ \varphi + cos\ \alpha \cdot sin\ \varphi,$$

получаемъ:

$$\int_0^\pi sin\ \alpha \cdot sin\ (\alpha + \varphi) \cdot d\alpha = \int_0^\pi sin^2\alpha \cdot cos\ \varphi \cdot d\alpha + \int_0^\pi sin\alpha \cdot cos\ \alpha \cdot sin\ \varphi \cdot d\alpha.$$

Рѣшеніе второго интеграла въ общемъ видѣ будетъ $sin\ \varphi \cdot \left[\frac{sin^2\alpha}{2}\right]$, которое, будучи взято между означенными предѣлами, равняется 0. Такимъ образомъ, приравнивая второй членъ предыдущаго уравненія 0 и подставляя вмѣсто перваго члена $\int_0^\pi sin^2\alpha \cdot d\alpha$ указанное для него на стр. 307 рѣшеніе $\frac{\pi}{2}$, будемъ имѣть среднюю мощность равною

$$P = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \cdot cos\varphi.$$

Если введемъ, теперь, вмѣсто наибольшихъ значеній дѣйствующія значенія, то будемъ имѣть:

$$P = E \cdot i \cdot cos\ \varphi. \qquad \qquad (52)$$

Слѣдовательно, законъ, по которому произведеніе напряженія на силу тока даетъ мощность, имѣетъ силу только для мгновенныхъ значеній, но не для дѣйствующихъ значеній. При сдвигѣ фазъ, какъ мы видимъ, необходимо кажущуюся мощность $E \cdot i$ умножить еще на косинусъ угла сдвига фазъ. Поэтому величину $cos\ \varphi$ называютъ **коэффиціентомъ мощности**. Такое названіе его тѣмъ болѣе умѣстно, что на практикѣ видъ кривой отклоняется отъ синусоиды и потому, строго говоря, этотъ множитель уже не будетъ представлять собою косинуса. Коэффиціентъ мощности въ этомъ случаѣ опредѣляется вообще, какъ отношеніе дѣйствительной мощности, отсчитываемой по ваттметру, къ кажущейся, т. е.

$$cos\ \varphi = \frac{P}{E \cdot i}.$$

Въ примѣрѣ ст. 75 мы имѣли напряженіе у зажимовъ машины $e = 2\,000$ вольтамъ и силу тока $i = 50$ амперамъ, кажущаяся мощность въ этомъ случаѣ составляетъ $2\,000 \cdot 50 = 100\,000$ вольтъ. Дѣйствительная мощность, напротивъ, вслѣдствіе заданнаго коэффиціента мощности $cos\ \varphi = 0{,}8$, будетъ только

$$P = e \cdot i \cdot cos\ \varphi = 100\,000 \cdot 0{,}8 = 80\,000 \text{ ваттъ.}$$

Мощность, сообщаемая паровою машиною динамомашинѣ, уменьшится соотвѣтственно до размѣровъ дѣйствительной мощности. Поэтому, хотя избытокъ кажущейся мощности надъ дѣйствительною мощностью и не требуетъ затраты энергіи, но все же сдвигъ фазъ оказывается невыгоднымъ по своему дѣйствію. Мощность въ 80 000 ваттъ въ вышеуказанномъ примѣрѣ была получена помощью чрезмѣрно высокаго напряженія у зажимовъ, которое должно наряду съ омическимъ сопротивленіемъ преодолѣвать и индуктивное сопротивленіе. Слѣдовательно, машина должна быть построена на высокое напряженіе, тогда какъ для мощности идетъ въ расчетъ **только часть этого послѣдняго**.

Это станетъ еще болѣе яснымъ, если мы для опредѣленія мощности обратимся къ уравненію, имѣющему силу какъ для машинъ постояннаго тока, такъ и перемѣннаго, а именно:

$$P = i^2 \cdot w.$$

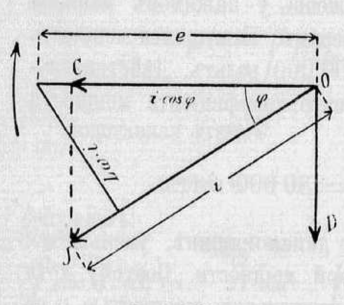
Вмѣсто $i \cdot w$ подставимъ, согласно фиг. 196, произведеніе $e \cdot cos\ \varphi$. Тогда получимъ:

$$P = e \cdot cos\ \varphi \cdot i.$$

Послѣднее уравненіе указываетъ ясно, что при расчетѣ мощности изъ всего напряженія принимается во вниманіе только слагающая $e \cdot cos\ \varphi$, имѣющая ту же фазу, что и сила тока.

Но мы можемъ иначе посмотрѣть на дѣло и въ уравненіи $P = e \cdot i \cdot cos\ \varphi$ принимать за одинъ множитель произведеніе $i \cdot cos\ \varphi$. Изъ фиг. 205 видимъ, что $i \cdot cos\ \varphi$ есть OC—проэкція вектора i на векторъ e. Такимъ образомъ, находимъ, что для полученія мощности необходимо напряженіе перемножить съ составляющей тока, имѣющей одинаковую съ напряженіемъ фазу.

Эту слагающую $OC = i \cdot cos\ \varphi$ называютъ ваттною слагающей тока или ваттнымъ токомъ, тогда какъ перпендикулярную къ ней слагающую безваттнымъ токомъ. Въ силу того, что на станціяхъ всѣ расчеты привыкли производить, принимая напряженіе сѣти постояннымъ, разложеніе тока на его составляющія оказалось чрезвычайно удобнымъ, хотя казалось бы, что было бы цѣлесообразнѣе разложеніе на двѣ составляющія именно напряженія.

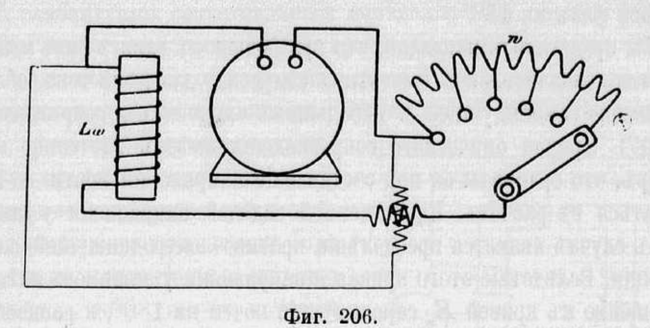


Фиг. 205.

Выше мы же видѣли вліяніе сдвига фазъ въ томъ, что при заданной мощности и силѣ тока напряженіе должно быть чрезмѣрно велико. Теперь же, наоборотъ, мы скажемъ, что при заданной мощности и напряженіи сила тока должна быть излишне высока, такъ какъ для опредѣленія мощности принимается во вниманіе только одна изъ составляющихъ тока. Большая сила тока требуетъ, понятно, большаго поперечнаго сѣченія мѣди у генераторовъ, проводовъ и двигателей, или при данномъ поперечномъ сѣченіи мѣди потеря на тепло Джоуля будетъ несоотвѣтственно велика. Поэтому сдвига фазъ стараются по возможности избѣжать, дѣлая наивозможно слабѣе самоиндукцію генераторовъ и двигателей.

Особенно ясно обнаруживается вліяніе сдвига фазъ на мощность, если къ постоянному напряженію у зажимовъ присоединить послѣдовательно включенныя катушку съ самоиндукціей и перемѣнное омическое сопротивленіе (фиг. 206). Мощность въ цѣпи тока будетъ измѣряться ваттметромъ. Когда рычагъ представленнаго на фигурѣ реостата будетъ перемѣщенъ вправо, и потому включенное сопротивленіе будетъ велико, то сила тока, а слѣдовательно и мощность, будутъ незначительны. Если, теперь, перемѣщать рычагъ постепенно влѣво, то сила тока будетъ возрастать, и

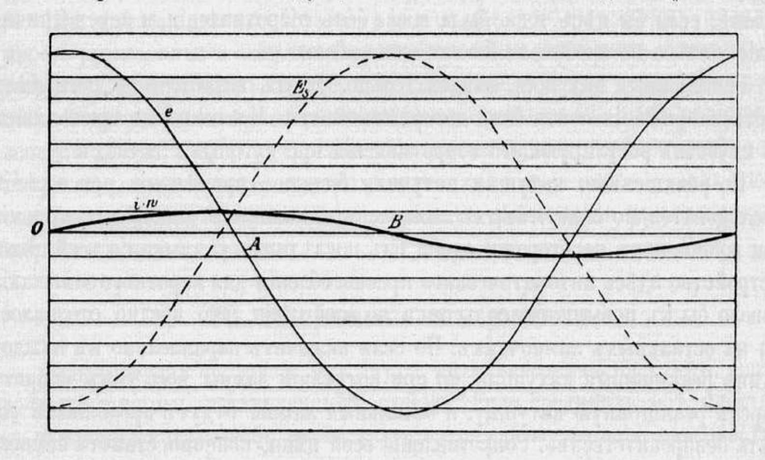
мощность, согласно ожиданіямъ, станетъ увеличиваться. Мы дойдемъ, наконецъ, до такой точки, при которой, хотя сила тока, благодаря дальнѣйшему выключенію реостата, и будетъ возрастать, но показанія ваттметра начнутъ снова падать. Если, наконецъ, рычагъ передвинемъ совсѣмъ влѣво,



Фиг. 206.

то сила тока, понятно, возрастетъ, но, несмотря на это, показанія ваттметра упадутъ почти до нуля.

Это объясняется очень просто тѣмъ, что при очень небольшомъ омическомъ сопротивленіи самоиндукція вызываетъ большой сдвигъ фазъ между



Фиг. 207.

силой тока и напряженіемъ, и произведеніе $e \cdot i \cdot cos\varphi$ становится очень незначительной величиной. Мы это можемъ прослѣдить и изъ площади треугольника на фиг. 196. Эта площадь при постоянной гипотенузѣ e достигаетъ своего максимума тогда, когда оба катета равны другъ другу,

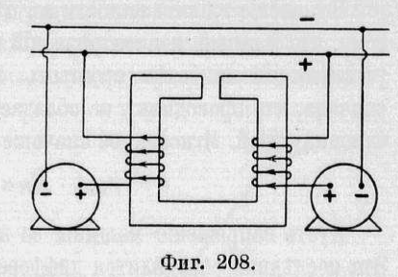
т. е. когда w становится равнымъ $L\omega$. Если площадь равна $\frac{1}{2} \cdot i \cdot w \cdot L\omega \cdot i$, то при постоянномъ $L\omega$ она пропорціональна мощности $i^2 \cdot w$. Эта мощность достигаетъ своего наибольшаго значенія при w равномъ $L\omega$, т. е. при сдвигѣ фазъ въ 45°.

Чтобы представить наглядно, что при большомъ сдвигѣ фазъ мощность становится незначительной, вычертимъ синусоиду для цѣпи тока, обладающей большою самоиндукціей и небольшимъ омическимъ сопротивленіемъ (фиг. 207). Кривая омическаго сопротивленія имѣетъ настолько пологій характеръ, что ординаты ея при составленіи напряженій почти не будутъ приниматься въ расчетъ. Единственной задачей напряженія у зажимовъ въ этомъ случаѣ является преодолѣніе противоэлектродвижущей силы самоиндукціи. Вслѣдствіе этого кривая e напряженія у зажимовъ смѣщается по отношенію къ кривой E_s самоиндукціи почти на 180°, и разность фазъ между напряженіемъ и силою тока будетъ почти въ 90°. Если составимъ, теперь, произведенія изъ мгновенныхъ значеній напряженія и силы тока, то въ промежуткѣ времени отъ O до A они будутъ положительными и отъ A до B отрицательными. Такъ какъ оба промежутка почти равны другъ другу, то полная мощность будетъ почти нуль. Она была бы совершеннымъ нулемъ, если бы цѣпь тока была вовсе безъ сопротивленія, и перемагничиваніе желѣза не требовало бы затраты работы.

Реакціонныя катушки, слѣдовательно, даютъ возможность поглощать часть напряженія почти безъ потери мощности. Поэтому ихъ примѣняютъ въ качествѣ регулирующаго сопротивленія при дуговыхъ лампахъ.

Но реакціонныя катушки получили большое примѣненіе при горѣніи послѣдовательно включенныхъ лампочекъ накаливанія для предотвращенія при возможномъ перегораніи одной изъ послѣднихъ размыканія всей цѣпи. Устройство здѣсь автоматическаго приспособленія для короткого замыканія повело бы къ повышенію силы тока во всей цѣпи, что вредно отозвалось бы на остальныхъ лампочкахъ. Но если включить параллельно къ каждой лампѣ реакціонныя катушки, то при потуханіи лампы весь токъ пойдетъ черезъ реакціонную катушку, и остальныя лампы будутъ продолжать горѣть безпрепятственно. Сопротивленіе всей цѣпи, конечно, станетъ немного больше, а сила тока немного меньше. Но при большомъ числѣ послѣдовательно включенныхъ лампъ это будетъ не существенно, а въ этомъ случаѣ и тѣмъ болѣе, такъ какъ коэффиціентъ самоиндукціи реакціонной катушки непостояненъ. Вѣдь если теперь весь токъ пойдетъ черезъ реакціонную катушку, то онъ усилитъ магнитный потокъ и противоэлектродвижущую силу, и потому токъ во всей цѣпи ослабнетъ. Но если катушка уже нормально работаетъ при высокой магнитной индукціи, то предѣлъ усиленія магнитнаго потока обусловливается насыщеніемъ желѣза.

Наконецъ, особенно важное значеніе реакціонныя катушки имѣютъ при параллельной работѣ машинъ перемѣннаго тока. Какъ мы уже видѣли въ ст. 32, самоиндукція сопротивляется измѣненію тока подобно своего рода инерціи. Этимъ свойствомъ самоиндукціи пользуются, когда опасаются, что сильные токи станутъ переходить съ одной изъ параллельно включенныхъ машинъ перемѣннаго тока на другую (см. ст. 102). Эти токи поглощаютъ при помощи реакціонныхъ катушекъ, которыя включаются между генераторомъ и собирательной шиной. Преимущество, получающееся при этомъ, столь значительно, что оно превосходитъ тотъ ущербъ, который получается отъ потери напряженія въ реакціонныхъ катушкахъ. Потеря мощности въ такой реакціонной катушкѣ сравнительно невелика, такъ какъ токъ отстаетъ отъ напряженія у зажимовъ реакціонной катушки почти на 90°.



Фиг. 208.

При схемѣ, данной Свинбурномъ (фиг. 208), потерю напряженія въ реакціонныхъ катушкахъ можно вообще уменьшить. Токи обоихъ генераторовъ проходятъ по обмоткамъ, наложеннымъ на сердечникъ реакціонной катушки, по противоположнымъ направленіямъ, такъ что при равенствѣ обоихъ токовъ не создается никакой магнитодвижущей силы. Когда же между обѣими машинами начинаютъ перетекать уравнивающіе токи, тогда реакціонная катушка начинаетъ дѣйствовать и препятствуетъ возрастанію этихъ токовъ.

78. Напряженіе отъ емкости.

Конденсаторъ состоитъ изъ двухъ металлическихъ пластинъ, раздѣленныхъ тонкимъ изолирующимъ слоемъ. Если соединить обѣ пластины съ зажимами какого-либо источника электричества, то одна изъ пластинъ заряжается положительно, а другая—отрицательно. Это воззрѣніе, которое привилось изъ электростатики, не согласуется съ теоріей Максвелля, по которой въ движеніе приходитъ постоянно только положительное электричество. Но мы сможемъ согласовать оба эти воззрѣнія, принимая, что заряженіе отрицательной пластины происходитъ не путемъ притока отрицательнаго электричества, а посредствомъ утечки положительнаго. Та-

кимъ образомъ мы приходимъ къ представленію о круговомъ токѣ, который отъ положительнаго зажима машины течетъ къ конденсатору, а отъ отрицательной пластины конденсатора обратно на машину. Токъ этотъ будетъ существовать до тѣхъ поръ, пока конденсаторъ не будетъ совершенно заряженъ, т. е. пока противодѣйствующее напряженіе E_c сообщеннаго ему количества электричества не будетъ равно приложенному къ нему напряженію. Поэтому говорятъ также, что извѣстнымъ количествомъ электричества конденсаторъ заряжается до извѣстнаго (противо-) напряженія E_c.

Выясненіе вліянія емкости въ цѣпяхъ перемѣнныхъ токовъ важно потому, что каждый концентрическій кабель является конденсаторомъ. Для установленія наиболѣе простымъ образомъ соотношеній, предположимъ сначала, что проводникъ не обладаетъ ни омическимъ сопротивленіемъ, ни самоиндукціей. Мгновенное значеніе напряженія машины будетъ:

$$e = e_{max} \cdot \sin\alpha = e_{max} \cdot \sin(\omega t).$$

Пусть напряженіе машины за время dt возрастетъ на величину de. Эта послѣдняя опредѣлится дифференцированіемъ предыдущаго уравненія:

$$de = e_{max} \cdot \cos(\omega t) \cdot \omega \cdot dt.$$

Передаваемое при этомъ конденсатору количество электричества dQ, согласно стр. 136, пропорціонально увеличенію напряженія de и емкости конденсатора. При этомъ C необходимо выразить въ единицахъ, соотвѣтствующихъ вольту и амперу, слѣдовательно, въ фарадахъ. Такимъ образомъ, получаемъ:

$$dQ = C \cdot de = C \cdot e_{max} \cdot \omega \cdot \cos\alpha \cdot dt.$$

Частное $dQ : dt$ будетъ количествомъ электричества, сообщаемымъ конденсатору въ единицу времени, или силою тока i отъ емкости. Мгновенное значеніе этого тока, слѣдовательно, будетъ:

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \omega \cdot e_{max} \cdot \cos\alpha.$$

Отсюда, сила тока является косинусоидальной функціей угла α, гдѣ α уголъ, образуемый векторомъ напряженія машины съ нулевымъ положеніемъ. Для $\alpha = 0$ $\cos\alpha = 1$, и сила тока имѣетъ свою наибольшую величину:

$$i_{max} = C \cdot \omega \cdot e_{max}.$$

Введемъ, теперь, въ обѣ части уравненія дѣйствующія значенія; тогда дѣйствующее значеніе тока отъ емкости будетъ:

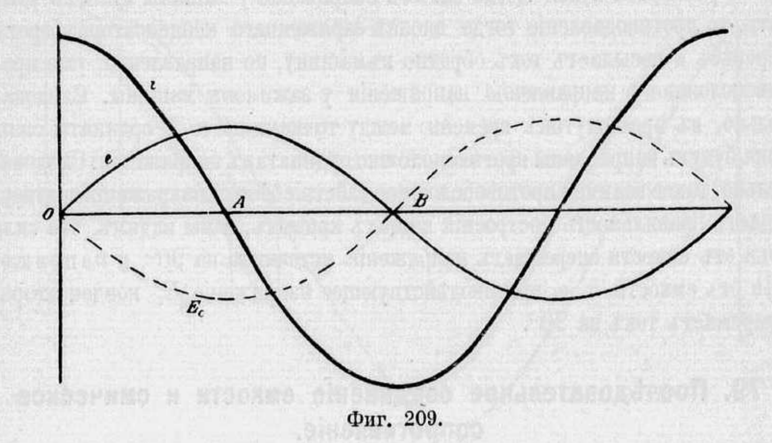
$$i = C \cdot \omega \cdot e.$$

Такъ какъ напоръ отъ напряженія машины и противодавленіе E_c отъ конденсатора въ каждый моментъ другъ друга уравновѣшиваютъ, то противоэлектродвижущая сила конденсатора E_c численно равна напряженію машины e, и изъ предыдущаго уравненія получаемъ:

$$E_c = \frac{i}{C \cdot \omega} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (53)$$

Такимъ образомъ, въ цѣпи теперь существуетъ не одно только напряженіе машины, но также и противоэлектродвижущая сила, которая должна преодолѣваться напряженіемъ машины. Опредѣлимъ теперь ея фазу.

На фиг. 209 тонко очерченная кривая e представляетъ измѣненіе напря-



Фиг. 209.

женія машины въ зависимости отъ времени, при чемъ въ качествѣ абсциссъ нанесены дуги, откладываемыя векторомъ напряженія машины, начиная отъ нулевого положенія. При вышеуказанномъ предположеніи, что цѣпь тока совершенно не обладаетъ ни самоиндукціей, ни омическимъ сопротивленіемъ, мы имѣли, что сила тока пропорціональна косинусу углу α. Она, слѣдовательно, будетъ имѣть свой положительный максимумъ при $\alpha = 0$ и будетъ равна нулю при $\alpha = 90°$. Такимъ образомъ, мы получимъ жирно очерченную кривую i тока отъ емкости. Изъ того положенія, что противоэлектродвижущая сила конденсатора имѣетъ направленіе какъ разъ противоположное напряженію у зажимовъ, получается обозначенная пунктиромъ кривая E_c. Послѣдняя опережаетъ кривую силы тока на 90°.

Результаты, полученные нами математическихъ путемъ, необходимо все же провѣрить, разсмотрѣвъ нѣсколько характеристическихъ моментовъ.

Въ точкѣ O кривая напряженія у зажимовъ машины пересѣкаетъ ось абсциссъ и наиболѣе крута. Измѣненіе напряженія у машины въ этотъ моментъ въ каждую единицу времени будетъ наибольшее и количество электричества, которое машина переводитъ на конденсаторъ, будетъ также наибольшимъ. Сила тока, слѣдовательно, достигаетъ своего максимума. Пока напряженіе возрастаетъ, т. е. за промежутокъ времени OA, токъ имѣетъ одинаковое направленіе съ напряженіемъ, и ординаты ихъ обоихъ будутъ положительными.

Когда же напряженіе машины въ точкѣ A достигаетъ своего наибольшаго значенія, то оно въ теченіе небольшого промежутка времени не претерпѣваетъ вовсе никакихъ измѣненій, и сила тока, поэтому, въ этотъ моментъ равняется нулю. Когда затѣмъ напряженіе у машины станетъ убывать, то противодавленіе тогда вполнѣ заряженнаго конденсатора беретъ перевѣсъ и посылаетъ токъ обратно въ машину, по направленію, уже противоположному направленію напряженія у зажимовъ машины. Слѣдовательно, въ промежутокъ времени между точками A и B ординаты силы тока будутъ направлены противоположно ординатамъ напряженія. Слѣдовательно, такое взаимно противоположное дѣйствіе обоихъ напряженій подтверждаетъ правильность построенія нашихъ кривыхъ, и мы видимъ, что сила тока отъ емкости опережаетъ напряженіе источника на 90°, и напряженіе отъ емкости, т. е. противодѣйствующее напряженіе E_c конденсатора, опережаетъ токъ на 90°.

79. Послѣдовательное соединеніе емкости и омическое сопротивленіе.

До сихъ поръ мы предполагали, что между машиною и конденсаторомъ не существуетъ никакого омическаго сопротивленія, что напряженіе у машины, слѣдовательно, равновелико напряженію у зажимовъ кондесатора. Если же между машиной и конденсаторомъ находится сопротивленіе w, то напряженіе у машины e должно покрыть омическую потерю напряженія $i \cdot w$, а также преодолѣть противоэлектродвижущую силу конденсатора. Поэтому вычертимъ на фиг. 210 сначала жирно очерченную кривую омической потери напряженія $i \cdot w$ и опережающую ее на 90° кривую напряженія отъ емкости E_c.

Тогда получимъ:

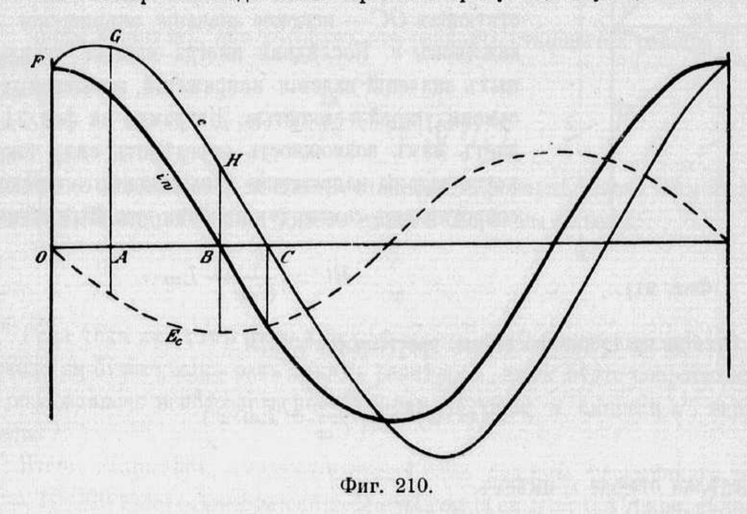
Въ точкѣ O напряженіе отъ емкости E_c равно нулю. Напряженіе машины e должно доставлять только омическое напряженіе; ея мгновенное значеніе, слѣдовательно, OF.

Въ точкѣ A напряженіе у зажимовъ должно доставить значительное омическое напряженіе и кромѣ того преодолѣть противодѣйствующее напряженіе конденсатора. Такимъ образомъ получаемое мгновенное значеніе напряженія у зажимовъ GA.

Въ точкѣ B омическое напряженіе равно нулю, и напряженіе у зажимовъ HB должно только преодолѣть равное и противодѣйствующее напряженіе конденсатора.

Наконецъ, въ точкѣ C омическое напряженіе равно напряженію, доставляемому конденсаторомъ, и напряженіе у зажимовъ, слѣдовательно, въ этотъ моментъ равно нулю.

Если вычертимъ подобнымъ образомъ кривую e, то увидимъ, что кривая тока опережаетъ кривую напряженія. Уголъ сдвига фазъ на фиг. 210 будетъ BC. Емкость, стало быть, вызывая опереженіе напряженія силою тока, т. е. давая отрицательный сдвигъ фазъ, по своему дѣйствію противоположна самоиндукціи.

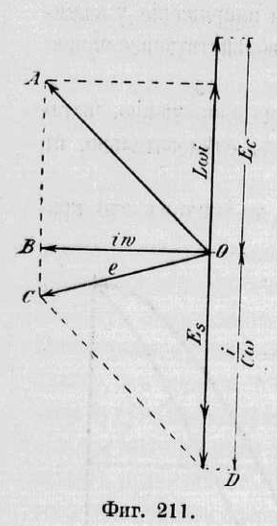


Фиг. 210.

80. Полный законъ Ома для перемѣннаго тока.

Разсмотримъ теперь случай, когда омическое сопротивленіе, самоиндукція и емкость включены послѣдовательно другъ другу. На фиг. 211 пусть OB векторъ омическаго напряженія $i \cdot w$ совпадаетъ какъ разъ съ нулевымъ положеніемъ. Тогда векторъ E_s самоиндукціи, отставая на 90° отъ тока, совпадетъ, слѣдовательно, съ отрицательнымъ направленіемъ оси

ординатъ. Этотъ векторъ уравновѣсится противоположно направленной слагающей напряженія у зажимовъ $L\omega \cdot i$. Изъ $i \cdot w$ и $L\omega \cdot i_s$ получается равнодѣйствующая OA. Но въ то же время въ цѣпи тока дѣйствуетъ еще напряженіе E_c, векторъ котораго, какъ опережающій токъ на 90°, совпадетъ съ положительнымъ направленіемъ оси ординатъ. Это напряженіе E_c, согласно стр. 340, должно уравновѣшиваться противоположно направленной слагающей $\frac{i}{C \cdot \omega}$ напряженія у зажимовъ. Изъ вектора OA и вектора $\frac{i}{C \cdot \omega}$ получается равнодѣйствующая OC — искомое значеніе напряженія у зажимовъ e. Послѣдняя иногда меньше отдѣльныхъ значеній паденія напряженій, вызываемыхъ самоиндукціей и емкостью. Діаграмма на фиг. 211 даетъ намъ возможность опредѣлить силу тока, когда заданы напряженіе у зажимовъ, омическое сопротивленіе, самоиндукція и емкость. Мы имѣемъ:



Фиг. 211.

$$BC = \frac{i}{C\omega} - L\omega \cdot i.$$

Отсюда въ прямоугольномъ треугольникѣ OBC:

$$e^2 = (i \cdot w)^2 + \left(\frac{i}{C\omega} - L\omega \cdot i\right)^2.$$

Опредѣляя отсюда i, имѣемъ:

$$i = \frac{e}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2}} \quad \ldots \ldots \ldots (54)$$

Въ этомъ полномъ законѣ Ома для перемѣннаго тока знаменатель будетъ кажущимся сопротивленіемъ (Impedanz) всей цѣпи. Онъ изобразится гипотенузой прямоугольнаго треугольника, однимъ катетомъ котораго будетъ омическое сопротивленіе, а другимъ разность $\frac{1}{C\omega} - L\omega$. При этомъ необходимо снова указать на то, что емкость должна быть выражена въ фарадахъ. Для полученія числа фарадъ слѣдуетъ число микрофарадъ умножить на 10^{-6}.

Очень знаменательно, что величина ω въ уравненіи (54) въ выраженіи, стоящемъ между скобками, одинъ разъ входитъ въ числитель, а другой разъ въ знаменатель. Слѣдовательно, должно найтись такое число періодовъ, при которомъ эта разность будетъ равна нулю. Его мы опредѣлимъ изъ уравненія:

$$\frac{1}{C\omega} - L\omega = 0.$$

Опредѣляя изъ этого послѣдняго ω, имѣемъ:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C \cdot L}}.$$

Число періодовъ, при которомъ эта разность становится равною 0, будетъ:

$$\sim = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{C \cdot L}}.$$

При этомъ значеніи величина, стоящая въ формулѣ закона Ома въ знаменателѣ между скобками, будетъ равна нулю, и мы имѣемъ:

$$i = \frac{e}{w}.$$

Сила тока въ этомъ случаѣ будетъ имѣть наибольшее значеніе, и величина ея будетъ какъ разъ такихъ размѣровъ, какъ будто сопротивленіе w присоединено непосредственно безъ самоиндукціи и емкости къ напряженію e.

Пусть, напримѣръ, электродвижущая сила машины перемѣннаго тока $E = 10\,000$ вольтъ, коэффиціентъ самоиндукціи ея $L = 0{,}4$ генри, емкость кабеля $C = 2{,}5$ микрофарады и сопротивленіе кабеля (прямой и обратный) 5 омъ.

Число періодовъ $\sim$ пусть въ началѣ нормальное, т. е. 50.

Емкость кабеля мы можемъ предположить замѣщенною канденсаторомъ, включеннымъ посрединѣ между машиною и концомъ кабеля. Тогда сопротивленіе между машиною и конденсаторомъ мы должны считать равнымъ половинѣ всего сопротивленія, т. е. 2,5 ома. Путемъ такого грубаго расчета мы получаемъ при нормальномъ числѣ періодовъ $\sim = 50$, согласно уравн. (54), токъ отъ емкости:

$$i = \frac{10\,000}{\sqrt{2{,}5^2 + \left(\frac{10^6}{2{,}5 \cdot 50 \cdot 6{,}28} - 0{,}4 \cdot 6{,}28 \cdot 50\right)^2}} = 8{,}7.$$

Эта сила тока входитъ въ этомъ случаѣ въ кабель, несмотря на то, что онъ разомкнутъ. Уголъ сдвига фазъ при этомъ равенъ почти 90°, величина $\cos\varphi$ почти равна нулю, а потому мощность также почти равна нулю.

Теперь спрашивается, при какомъ числѣ періодовъ сила тока при заданныхъ выше размѣрахъ электродвижущей силы, индуктивномъ сопротивлении и емкости достигнетъ своего максимума?

Опасное число періодовъ получается изъ уравненія для ~:

$$\sim = \frac{1}{2\pi\sqrt{C\cdot L}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2{,}5\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}4}} = 160.$$

При этомъ числѣ періодовъ величина, стоящая въ знаменателѣ формулы закона Ома между скобками, равна нулю, и сила тока, несмотря на то, что кабель разомкнутъ, будетъ:

$$i = \frac{E}{w} = \frac{10\,000}{2{,}5} = 4\,000 \text{ амперъ!!!}$$

При этомъ напряженія отъ емкости и самоиндукція достигаютъ чрезмѣрныхъ размѣровъ:

$$\frac{i}{C\omega} = L\omega\cdot i = 0{,}4\cdot 2\pi\cdot 160\cdot 4\,000 = 1{,}62\cdot 10^6 \text{ вольтъ.}$$

Понятно, поперечное сѣченіе мѣди не выдерживаетъ столь высокую силу тока, а изоляція столь высокое напряженіе. Состояніе, наступающее при критическомъ числѣ періодовъ, называютъ резонансомъ. Своеобразнымъ здѣсь является необычайная сила тока, несмотря на разомкнутость кабеля, и чрезмѣрное напряженіе, несмотря на нормальное возбужденіе машины. Но при этомъ слѣдуетъ замѣтить, что вышеуказанная величина $L = 0{,}4$ выбрана сравнительно большою и годится только для небольшихъ машинъ, каковою она приблизительно принимается при испытаніи изоляціи. При меньшемъ L критическое число періодовъ, понятно, еще больше 160.

81. Параллельное соединеніе самоиндукціи и емкости.

На фиг. 212а представленъ случай, когда включены параллельно двѣ вѣтви тока, изъ которыхъ одна обладаетъ омическимъ сопротивленіемъ и самоиндукціей, а другая омическимъ сопротивленіемъ и емкостью. Напряженіе у зажимовъ e общее для обѣихъ вѣтвей. Векторъ этого послѣдняго является, слѣдовательно, гипотенузой съ одной стороны катетовъ $i_1\cdot w_1$ и $L\omega\cdot i$, а съ другой стороны катетовъ $i_2\cdot w_2$ и $\frac{i_2}{C\cdot\omega}$ (фиг. 212b). При этомъ

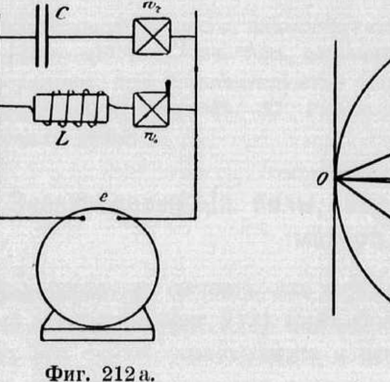
токъ i_1 отстаетъ отъ напряженія у зажимовъ e на уголъ φ_1, который опредѣляется изъ уравненія:

$$tg\,\varphi_1 = \frac{L\omega_1}{w_1}.$$

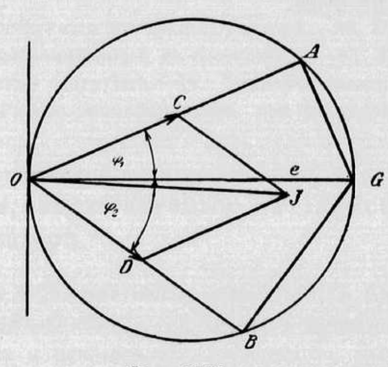
Наоборотъ, сила тока i_2 опережаетъ напряженіе у зажимовъ на уголъ φ_2. Тогда имѣемъ:

$$tg\,\varphi_2 = \frac{i/C\cdot\omega}{i_2\cdot w_2} = \frac{i/C\cdot\omega}{w_2}.$$

Теперь, на напряженіи у зажимовъ e, какъ на діаметрѣ, описываемъ окружность и проводимъ векторъ OA такъ, чтобы онъ обрзовалъ съ діаметромъ уголъ φ. Тогда OA представитъ омическую потерю напряженія



Фиг. 212а.



Фиг. 212b.

и AG индуктивное паденіе напряженія въ первой вѣтви. Затѣмъ проведемъ векторъ OB такъ, чтобы онъ образовалъ съ діаметромъ уголъ φ_2. Тогда OB представитъ омическую потерю напряженія, а BG составляющую напряженія у зажимовъ второй цѣпи, которая уравновѣшиваетъ противоэлектродвижущую силу конденсатора. При этомъ углы φ_1 и φ_2 расположатся по разныя стороны діаметра. Раздѣлимъ, теперь, хорду OA на сопротивленіе w_1; тогда получимъ:

$$i_1 = \frac{OA}{w_1} = OC.$$

Подобнымъ же образомъ, раздѣляя напряженіе OB на сопротивленіе w_2, получаемъ токъ i_2:

$$i_2 = \frac{OB}{w_2} = OD.$$

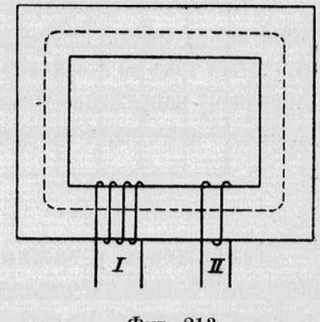
Изъ слагающихъ $i_1 = OC$ и $i_2 = OD$ получается, по правилу параллелограмма силъ, равнодѣйствующая OJ. Послѣдняя представитъ полный токъ i по силѣ и фазѣ. Мы видимъ, что векторъ этого полнаго тока смѣщенъ относительно напряженія у зажимовъ на очень небольшой уголъ. Соотвѣтствующимъ подборомъ можно, слѣдовательно, сдвигъ фазъ въ проводахъ сѣти и машинѣ сдѣлать равнымъ нулю. Но, къ сожалѣнію, изъ-за незначительной прочности конденсаторовъ приходится отказаться отъ примѣненія ихъ для уравниванія создаваемаго самоиндукціей сдвига фазъ. Въ ст. 106 мы увидимъ, что перевозбужденный синхронный двигатель, противоэлектродвижущая сила котораго больше напряженія сѣти, также вызываетъ отрицательный сдвигъ фазъ. Поэтому подобнаго рода двигатели примѣняются съ успѣхомъ для приведенія сдвига фазъ въ главномъ проводѣ къ нулю.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

82. Электродвижущія силы, индиктируемыя въ трансформаторѣ.—83. Намагничивающій токъ.—84. Токъ, затрачиваемый на гистерезисъ.—85. Трансформаторъ при безъиндукціонной нагрузкѣ.—86. Трансформаторъ при индукціонной нагрузкѣ.—87. Работа трансформатора при разсѣяніи силовыхъ линій.

82. Электродвижущія силы, индуктируемыя въ трансформаторѣ.

Трансформаторъ состоитъ изъ двухъ катушекъ, намотанныхъ на желѣзный сердечникъ (фиг. 213). Силовой потокъ, создаваемый перемѣннымъ токомъ при своемъ возникновеніи и исчезновеніи, пересѣкаетъ двѣ катушки, намотанныя на одинъ и тотъ же желѣзный сердечникъ, и индуктируетъ въ обѣихъ катушкахъ электродвижущія силы, пропорціональныя числу оборотовъ проволоки. Для выясненія явленій въ первичной катушкѣ разсмотримъ сначала: трансформаторъ при холостой работѣ, т. е. когда отъ второй катушки не берется тока. Въ этомъ случаѣ первичная катушка представляетъ собою не что иное, какъ реакціонную катушку, въ виткахъ которой силовыя линіи, создаваемыя перемѣннымъ токомъ, индуктируютъ электродвижущую силу самоиндукціи. При этомъ избѣгаютъ, конечно, выраженія «самоиндукція» и замѣняютъ его выраженіемъ «индуктируемая электродвижущая сила» или «противоэлектродвижущая сила».



Фиг. 213.

Пусть N наибольшій магнитный потокъ, пересѣкающій плоскости витковъ, $\sim$ число періодовъ и ξ_1 число витковъ первичной катушки; тогда первичная электродвижущая сила, согласно уравн. (48) стр. 320, будетъ:

$$E_1 = 4{,}44 \cdot N \cdot \sim \cdot \xi_1 \cdot 10^{-8}.$$

Первичное напряженіе у зажимовъ, приложенное извнѣ къ трансформатору, имѣетъ, согласно основной діаграммѣ на стр. 326, двойную задачу: преодолѣть электродвижущую силу самоиндукціи и доставить омическую потерю напряженія. Но послѣдняя у трансформаторовъ, благодаря небольшому сопротивленію мѣдной обмотки, всегда очень незначительна. Поэтому электродвижущая сила E_1, индуктируемая при пересѣченіи силовыхъ линій, почти равна и противоположна по направленію напряженію у зажимовъ e_1 и позволяетъ притекать лишь столько току, сколько необходимо его для созданія силового поля. Токъ при холостой работѣ, слѣдовательно, всегда очень незначителенъ, такъ какъ уже слабый токъ достаточенъ для образованія въ замкнутомъ желѣзномъ сердечникѣ необходимаго магнитнаго потока.

Когда же измѣняющееся поле одновременно пересѣкаетъ и вторичную обмотку, то и въ этой послѣдней оно индуктируетъ электродвижущую силу E_2, имѣющую одинаковую фазу съ первичной электродвижущей силой. Если число оборотовъ вторичной катушки будетъ ξ_2, то, на основаніи уравн. (48) на стр. 320:

$$E_2 = 4{,}44 \cdot N \cdot \sim \cdot \xi_2 \cdot 10^{-8}.$$

Слѣдовательно, электродвижущія силы въ обѣихъ катушкахъ относятся между собою, какъ числа витковъ. При холостой работѣ, т. е. при отсутствіи тока во вторичной катушкѣ, электродвижущая сила E_2 равна вторичному напряженію у зажимовъ e_2. Поэтому, пренебрегая первичнымъ паденіемъ омическаго напряженія, получаемъ:

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{\xi_2}{\xi_1}.$$

Напряженія у зажимовъ при холостой работѣ относятся между собою какъ числа витковъ. Этотъ законъ справедливъ только при предположеніи, что обѣ обмотки не измѣняютъ своего положенія относительно другъ друга въ пространствѣ. Если же мы одну катушку расположимъ въ желѣзномъ барабанѣ, какъ, напримѣръ, обмотки на двойномъ T якорѣ, а индуктирующія стороны другой обмотки расположимъ по внутренней боковой поверхности желѣзнаго кольца, какъ, напримѣръ, у статора трехфазнаго

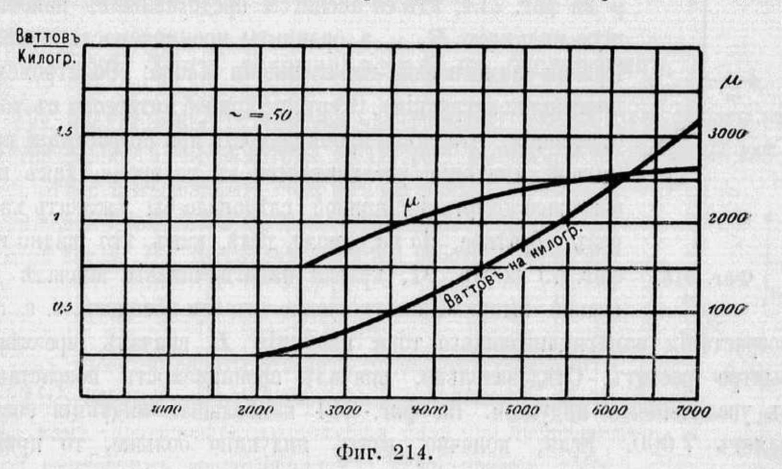
двигателя, то мы можемъ путемъ вращенія барабана измѣнять произвольно коэффиціентъ трансформаціи. Наибольшое значеніе вторичнаго напряженія у зажимовъ, равное отношенію чиселъ витковъ, получается тогда, когда плоскости обѣихъ катушекъ совпадаютъ. Наоборотъ, вторичное напряженіе равно нулю, когда плоскости располагаются подъ угломъ въ 90°. Такого рода индукціонные регуляторы находятъ себѣ примѣненіе при пускѣ въ ходъ и регулированіи однофазныхъ желѣзнодорожныхъ двигателей.

83. Намагничивающій токъ.

Такъ какъ первичная обмотка ненагруженнаго трансформатора по дѣйствію своему совершенно подобна реакціонной катушкѣ, то необходимый намагничивающій токъ получается, согласно уравненію (49) на стр. 320, равнымъ:

$$i_\mu = \frac{B_{max} \cdot l}{1{,}78 \cdot \xi_1 \cdot \mu}.$$

При этомъ B_{max} означаетъ наибольшее число силовыхъ линій, пересѣкающее плоскость витковъ и приходящееся на квадр. сант., l длину



Фиг. 214.

пути магнитнаго потока въ желѣзѣ и μ проницаемость желѣза. Послѣдняя величина, конечно, во время одного періода непостоянна, какъ это было предположено при выводѣ вышеуказаннаго уравненія. Но трансформаторы для обезпеченія незначительныхъ потерь на гистерезисъ и небольшого намагничивающаго тока работаютъ съ незначительною индукціей, т. е. въ первой части кривой намагничиванія, гдѣ величина μ почти постоянна.

Брать величину μ изъ кривой намагничиванія, снимаемой по баллистическому методу при постоянномъ токѣ, не представляется правильнымъ. Намагничивающій токъ какого-либо трансформатора, построеннаго изъ даннаго сорта желѣза, опредѣляютъ, поэтому, предпочтительнѣе опытнымъ путемъ. Изъ уравненія (48), на стр. 329, опредѣляютъ величину наибольшаго магнитнаго потока $\boldsymbol{N}$ и, дѣля его на поперечное сѣченіе желѣза, получаютъ наибольшую индукцію $\boldsymbol{B}_{max}$. Измѣренный намагничивающій токъ i_μ и наибольшая индукція даютъ величину μ по уравненію:

$$\mu = \frac{\boldsymbol{B}_{max} \cdot \boldsymbol{l}}{1{,}78 \cdot i_\mu \cdot \xi_1}.$$

Эта практически найденная величина для сотвѣтствующаго сорта желѣза вполнѣ достовѣрна, хотя само опредѣленіе величины μ теперь уже не такъ просто. Подъ μ правильнѣе подразумѣвать среднюю проницаемость, которая опредѣляется по вышеприведенному уравненію.

Согласно вышеуказанному способу, вычерчена кривая μ на фиг. 214, гдѣ ея абсциссы представляютъ наибольшую индукцію $\boldsymbol{B}_{max}$, а ординаты проницаемость желѣза. Кривая заимствована изъ сочиненія Каппа: «Электромеханическія конструкціи». Очертаніе кривой интересно въ томъ отношеніи, что здѣсь проницаемость при возрастаніи магнитной индукціи увеличивается въ то время, какъ изъ обычнаго очертанія кривой слѣдовало бы ожидать какъ разъ обратное. Но на самомъ дѣлѣ, какъ это видно изъ фиг. 59 на стр. 91, кривая намагничиванія вначалѣ довольно выпукла по отношенію къ оси абсциссъ, т. е. при возрастаніи намагничивающаго тока индукція $\boldsymbol{B}$ вначалѣ чрезмѣрно быстро растетъ. Слѣдовательно, вначалѣ проницаемость возрастаетъ съ увеличеніемъ индукціи. На фиг. 214 наибольшая индукція составляетъ 7 000. Если, конечно, взять индукцію больше, то кривая проницаемости μ съ увеличеніемъ насыщенія желѣза, понятно, опять пала бы.

Фиг. 215.

Опредѣлимъ, теперь, при помощи діаграммы векторовъ фазы напряженія и тока при холостомъ ходѣ (фиг. 215). Индуктируемая электродвижущая сила отстаетъ отъ намагничивающаго тока на 90°. Если мы, слѣдовательно, отложимъ векторъ тока i_μ влѣво вдоль по оси абсциссъ, то вектора электродвижущихъ силъ E_1 и E_2 направятся внизъ вдоль по оси

ординатъ. Въ то же время, такъ какъ электродвижущія силы относятся между собою, какъ числа витковъ, имѣемъ:

$$E_1 = \frac{E_2 \cdot \xi_1}{\xi_2}.$$

Векторъ первичной электродвижущей силы E_1 даетъ намъ въ соотвѣтствующемъ масштабѣ непосредственно векторъ вторичной электродвижущей силы, вслѣдствіе чего діаграмма чрезвычайно упрощается. При этомъ всѣ вторичныя напряженія умноженіемъ на ξ_1/ξ_2 будутъ приведены къ масштабу первичныхъ напряженій.

Такъ какъ первичное напряженіе у зажимовъ e_1 при разомкнутой вторичной цѣпи равно и противоположно по направленію противоэлектродвижущей силѣ E_1, то его векторъ совпадаетъ съ положительнымъ направленіемъ оси ординатъ. Уголъ между напряженіемъ у зажимовъ e_1 и силою тока i_μ при этомъ будетъ составлять 90°, и мощность, расходуемая при холостой работѣ, если пренебречь потерей на тепло Джоуля, равна нулю. До сихъ поръ мы, конечно, всюду предполагали, что перемѣнное намагничиваніе желѣза не требуетъ никакой затраты работы, теперь же перейдемъ къ опредѣленію потерь на гистерезисъ.

84. Токъ, затрачиваемый на гистерезисъ.

При изслѣдованіи трансформатора во время холостой его работы въ дѣйствительности мы замѣтимъ нѣкоторый расходъ ваттъ, который слѣдуетъ отнести къ повороту молекулъ въ желѣзѣ. Измѣримъ напряженіе у зажимовъ e_1, токъ при холостой работѣ i_0 и расходъ ваттъ P_h; тогда для холостой работы получаемъ:

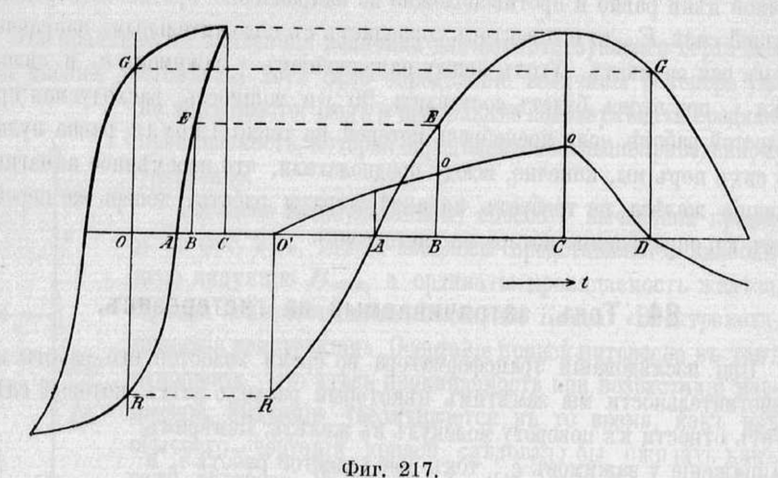
$$\cos\varphi = \frac{P_h}{e_1 \cdot i_0}.$$

Токъ холостой работы отстаетъ тогда, какъ указываетъ фиг. 216, на уголъ φ отъ напряженія у зажимовъ, въ то время какъ противоэлектродвижущая сила при пренебреженіи омическимъ сопротивленіемъ, какъ прежде, какъ разъ противоположна по направленію напряженію у зажимовъ. Индуктируемая электродвижущая сила, согласно стр. 322, отстаетъ на 90° отъ магнитнаго потока, благодаря измѣненію котораго она создается. Если, напримѣръ, электродвижущая сила на фиг. 216 будетъ наибольшею, то плотность магнитнаго потока въ это время должна равняться нулю, такъ какъ при этихъ

Фиг. 216.

условіяхъ измѣненіе магнитнаго потока, соотвѣтственно большему подъему синусоиды, наибольшее. Нанесемъ векторъ **B** въ дѣйствительности существующей индукціи влѣво вдоль по оси абсциссъ. Отсюда получаемъ, что индукція **B** отстаетъ отъ тока холостой работы i_0 на уголъ β.

Для бо́льшаго еще уясненія вычертимъ на фиг. 217 петлю цикла гистерезиса, при чемъ мгновенныя значенія тока при холостой работѣ отложимъ по оси абсциссъ, а индукцію **B** по оси ординатъ. Если напряженіе у зажимовъ e_1 является синусоидальной функціей времени, то и электродвижущая сила окажется такою же функціей. Вычерченная направо кривая магнитнаго потока, сдвинутая на $90°$ относительно кривой электро-



Фиг. 217.

движущей силы, будетъ, понятно, также синусоидой. Ея наибольшее значеніе будетъ равно наибольшему значенію кривой гистерезиса лѣвой половины фигуры.

Найдемъ, теперь, у кривой индукціи ординату, равную OR плотности магнитнаго потока остаточнаго магнетизма. Эту величину, согласно чертежу, имѣетъ ордината въ точкѣ O' и для этого момента сила тока равна нулю.

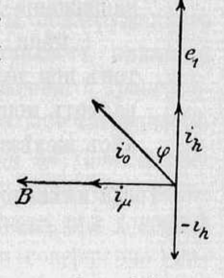
Въ точкѣ A, наоборотъ, плотность магнитнаго потока равна нулю; возьмемъ изъ кривой гистерезиса соотвѣтствующую абсциссу OA, которую отложимъ въ правой половинѣ фигуры по оси ординатъ.

Въ точкѣ B, согласно правой половинѣ фигуры, плотность магнитнаго потока равна EB, а соотвѣтствующій токъ, согласно кривой гистерезиса,

равенъ OB. Эту величину опять откладываемъ въ правой части фигуры по оси ординатъ.

Въ точкѣ C индукція и токъ при холостой работѣ одновременно достигаютъ своего наибольшаго значенія. Для опредѣленія, затѣмъ точки D, въ которой кривая силы тока пересѣкаетъ ось абсциссъ, найдемъ у синусоиды ординату GD, равную плотности магнитнаго потока GO остаточнаго магнетизма и т. д.

Изъ фиг. 217 ясно видно, что токъ при холостой работѣ и магнитная индукція имѣютъ неодинаковыя фазы, при чемъ индукція запаздываетъ по сравненію съ токомъ при холостой работѣ на моментъ времени $O'A$. Но въ то же время видно также, что кривая силы тока искажена. Слѣдовательно, для того, чтобы имѣть возможность ввести въ діаграмму векторъ i_0, мы должны существующій въ дѣйствительности токъ считать замѣненнымъ синусоидальнымъ токомъ съ такою же дѣйствующею силою.



Фиг. 218.

Разложимъ токъ при холостой работѣ i_0, согласно фиг. 218, на гистерезисный токъ $i_h = i_0 \cdot cos\varphi$ по направленію напряженія у зажимовъ и намагничивающій токъ $i_\mu = i_0 \cdot sin\varphi$ по направленію въ дѣйствительности существующей индукціи.

Это разложеніе производится при помощи коэффиціента мощности, наблюдаемаго при холостой работѣ. Мощность, затрачиваемая на гистерезисъ P_h, опредѣляется уравненіемъ:

$$P_h = E_1 \cdot i_0 \cdot cos\,\varphi = E_1 \cdot i_h,$$

гдѣ E_1 равно напряженію у зажимовъ.

Далѣе имѣемъ:

$$i_\mu = \sqrt{i_0^2 - i_h^2}.$$

Нельзя не замѣтить, что до сихъ поръ величины i_h и i_μ являются величинами, опредѣленными только исключительно численнымъ образомъ. Физическое значеніе ихъ станетъ для насъ яснымъ послѣ отложенія на фиг. 218 вектора $-i_h$ внизъ. Тогда намагничивающій токъ i_μ является равнодѣйствующимъ изъ полнаго тока при холостой работѣ i_0 и тока $-i_h$, т. е. изъ размагничивающаго дѣйствія гистерезиса. Слѣдовательно, векторъ $-i_h$ представляетъ собою размагничивающее дѣйствіе гистерезиса, тогда какъ векторъ i_μ дѣйствительную намагничивающую силу. Эта намагничивающая сила i_μ была бы

достаточна для созданія въ дѣйствительности существующаго поля, если бы не имѣлось никакого гистерезиса.

Полученные результаты разъяснимъ теперь на готовомъ нижеуказанномъ трансформаторѣ и опредѣлимъ у него проницаемость желѣза и потери ваттъ на килограммъ желѣза. У описаннаго, напримѣръ, въ «Электромеханическихъ конструкціяхъ» Каппа 36-ти-киловатнаго трансформатора

поперечное сѣченіе желѣза	$Q =$	900 см²,
длина магнитной цѣпи	$l =$	100 см,
число витковъ первичной обмотки . . .	$\xi_1 =$	315,
число періодовъ	$\sim =$	50,
напряженіе у зажимовъ первичной цѣпи	$e_1 =$	2 000 вольтъ.
токъ при холостой работѣ	$i_0 =$	0,36 ампера,
расходъ мощности при холостой работѣ	$P_h =$	400 ваттъ,
вѣсъ желѣза	$=$	765 клг.

Тогда имѣемъ:

$$i_h = \frac{P_h}{e_1} = \frac{400}{2\,000} = 0{,}2 \text{ ампера},$$

а намагничивающій токъ i_μ будетъ:

$$i_\mu = \sqrt{i_0^2 - i_h^2} = \sqrt{0{,}36^2 - 0{,}2^2} = 0{,}3 \text{ ампера}.$$

Для опредѣленія проницаемости даннаго сорта желѣза намъ необходима наибольшая индукція. Для этой цѣли мы, согласно уравненію (48) на стр. 320, имѣемъ:

$$B_{max} = \frac{N}{Q} = \frac{e_1 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot \sim \cdot \xi_1 \cdot Q} = 3\,180.$$

Подставляя полученную величину въ уравненіе (49), стр. 320, получаемъ магнитную проницаемость μ:

$$\mu = \frac{B_{max} \cdot l}{1{,}78 \cdot i_\mu \cdot \xi_1} = \frac{3\,180 \cdot 100}{1{,}78 \cdot 0{,}3 \cdot 315} = 1\,900.$$

Одновременно получаемъ потерю ваттъ на 1 клг при 50 періодахъ:

$$\frac{\text{ватты}}{\text{килограммы}} = \frac{400}{765} = 0{,}52.$$

Подобнымъ же образомъ по опытнымъ даннымъ опредѣлены кривыя фиг. 214. Они даютъ тѣ же величины, что и вышеопредѣленныя путемъ расчета. Если, теперь, вполнѣ извѣстны кривыя потерь желѣза и проницаемости, то при расчетѣ трансформаторовъ можно довольно точно заранѣе опредѣлить потери ваттъ и токъ при холостой работѣ. Необходимо при этомъ идти только обратнымъ путемъ тому, который былъ предложенъ для изслѣдованія сортовъ желѣза.

85. Трансформаторъ при безъиндукціонной нагрузкѣ.

Для того, кто уже знакомъ нѣсколько съ вліяніемъ самоиндукціи и теоріей реакціонной катушки, изслѣдованіе работы ненагруженнаго трансформатора, изложенное въ статьѣ 82, не представляетъ никакого особеннаго затрудненія. Уясненіе же работы нагруженнаго трансформатора, наоборотъ, вначалѣ представитъ нѣсколько больше затрудненій. Не совсѣмъ ясно представляютъ себѣ, что отъ вторичной катушки можно заимствовать токъ любой силы, и что первичная сила тока устанавливается автоматически по этой послѣдней. Въ то время, какъ при холостой работѣ большая противоэлектродвижущая сила почти совершенно уничтожаетъ притокъ тока, въ случаѣ нагрузки первичная сила тока тотчасъ же возрастаетъ, какъ только начинаетъ расходоваться вторичный токъ. Поэтому у многихъ здѣсь невольно является вопросъ, чѣмъ же собственно вызывается это усиленіе первичнаго тока или видимое уменьшеніе коэффиціента самоиндукціи, т. е. другими словами, многіе не представляютъ себѣ ясно зависимости между обѣими обмотками, которыя совершенно изолированы другъ отъ друга.

Конечно, очень просто изъ закона сохраненія энергіи вывести зависимость между первичнымъ и вторичнымъ токами. Энергія, сообщаемая первичной обмоткѣ, должна равняться суммѣ вторичной полезной работы со всѣми существующими потерями. Дѣйствительно, если обозначимъ черезъ w_1 сопротивленіе первичной, а черезъ w_2 сопротивленіе вторичной катушекъ и пренебрежемъ въ первичной цѣпи сдвигомъ фазъ вслѣдствіе незначительной величины безваттнаго тока i_μ, то для безиндукціонной нагрузки получимъ уравненіе:

$$e_1 \cdot i_1 = e_2 \cdot i_2 + i_1^2 \cdot w_1 + i_2^2 \cdot w_2 + P_h.$$

Такъ какъ потери очень незначительны, то при нашемъ разсмотрѣніи можно ими пренебречь. Тогда имѣемъ:

$$e_1 \cdot i_1 = e_2 \cdot i_2$$

или

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{\xi_2}{\xi_1}.$$

Слѣдовательно, силы тока обратно пропорціональны напряженіямъ или числамъ витковъ.

Хотя законъ сохраненія энергіи сталъ для насъ настолько обычнымъ, что является повсюду основнымъ началомъ нашего познанія, но нельзя все же отрицать и того, что въ этомъ случаѣ указанныя выше затрудненія все еще остаются неразрѣшенными для начинающаго изучать трансформаторы. Но эти затрудненія совершенно стушуются, если мы, по примѣру Каппа, обратимся къ магнитнымъ дѣйствіямъ первичнаго и вторичнаго токовъ и построимъ для этой цѣли діаграммы магнитодвижущихъ силъ.

Вторичный токъ при безъиндукціонной нагрузкѣ имѣетъ одинаковую фазу съ индуктируемой электродвижущей силой. Наоборотъ, первичный токъ имѣетъ почти одинаковую фазу съ первичнымъ напряженіемъ у зажимовъ, которое по направленію противоположно индуктируемой электродвижущей силѣ. Отсюда вытекаетъ, что первичный и вторичный токи имѣютъ смѣщеніе фазъ почти въ 180° по отношенію другъ къ другу и въ своихъ магнитныхъ дѣйствіяхъ уравновѣшиваютъ другъ друга. Поэтому кажущееся уменьшеніе коэффиціента самоиндукціи при нагрузкѣ объясняется тѣмъ, что большая часть ампервитковъ первичной обмотки нейтрализуется ампервитками вторичной.

Это станетъ еще болѣе понятнымъ, если замѣтимъ, что, пренебрегая омической потерей напряженія въ первичной цѣпи, мы получимъ противоэлектродвижущую силу численно равною постоянному напряженію у зажимовъ первичной цѣпи и направленною противоположно этому послѣднему.

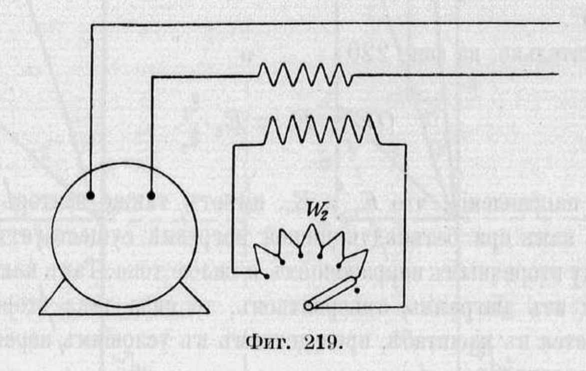
Отсюда магнитный потокъ будетъ:

$$N = \frac{e_1 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot \sim \cdot \xi_1}.$$

Такъ какъ всѣ величины въ правой части постоянны, то наибольшая величина магнитнаго потока будетъ одна и та же, будетъ ли работать трансформаторъ въ-холостую или съ нагрузкой. Если мы нагрузимъ работавшій до сихъ поръ въ-холостую трансформаторъ, то вторичный токъ произведетъ сильное размагничивающее дѣйствіе. Магнитный потокъ и противоэлектродвижущая сила вслѣдствіе этого на одно мгновеніе уменьшатся. Благодаря этому окажется возможнымъ притечь болѣе сильному первичному току. Послѣдній будетъ такой силы, что размагничивающее дѣйствіе вторичныхъ ампервитковъ будетъ уравновѣшено и возстановится прежнее поле холостой работы. Другими словами: первичные ампервитки $i_1\xi_1$ и вторичные ампервитки $i_2\xi_2$ даютъ сообща такое же магнитное дѣйствіе, что и ампервитки $i_0\xi_1$ при холостой работѣ.

Если же токъ при холостой работѣ i_0 очень незначителенъ по сравненію съ рабочимъ токомъ, то непосредственно имѣемъ: $i_1 \cdot \xi_1 = i_2 \cdot \xi_2$, т. е. токи обратно пропорціональны числу витковъ.

Этотъ законъ пригоденъ также и для послѣдовательнаго трансформатора (фиг. 219), у котораго первичная обмотка проходится главнымъ токомъ, который посылается машиною въ распредѣлительную цѣпь. Напряженіе у трансформатора, вслѣдствіе незначительнаго числа витковъ, пусть будетъ и при разомкнутой вторичной цѣпи незначительно по сравненію съ напряженіемъ сѣти. Если вторичная цѣпь разомкнута, то первичное и вторичное напряженіе у зажимовъ будетъ имѣть наибольшее значеніе и опредѣляется подобно тому, какъ при реакціонной катушкѣ.



Фиг. 219.

Если же мы, наоборотъ, рычагъ вторичнаго реостата перемѣстимъ съ нулевого контакта въ положеніе изображенное на фигурѣ, то мы будемъ тогда брать вторичный токъ, который останется безъ измѣненія, если мы будемъ перемѣщать рычагъ дальше влѣво. При предположеніи, что первичный токъ постояненъ, вторичный токъ будетъ также постояннымъ, такъ какъ онъ опредѣляется коэффиціентомъ трансформаціи. Но если мы будемъ измѣнять вторичное внѣшнее сопротивленіе w_2, то произведеніе изъ вторичнаго тока i_2 на вторичное внѣшнее сопротивленіе w_2 будетъ измѣняться. Такимъ образомъ, будетъ измѣняться также вторичное напряженіе у зажимовъ $i_2\,w_2$, отсюда и первичное напряженіе трансформатора. Это послѣднее будетъ равно нулю, когда вторичное внѣшнее сопротивленіе будетъ замкнуто на короткое.

Теперь перейдемъ къ вычерчиванію діаграммы токовъ **нагруженнаго трансформатора**, при чемъ примемъ во вниманіе токъ при холостой работѣ, но пренебрежемъ внутреннимъ сопротивленіемъ. Для этого раздѣлимъ всѣ ампервитки на число первичныхъ витковъ ξ_1; тогда получимъ діаграмму токовъ (фиг. 220), гдѣ векторъ i_0 является равнодѣйствующимъ изъ векторовъ i_1 и $\frac{i_2 \cdot \xi_2}{\xi_1}$.

При вычерчиваніи діаграммы мы строимъ сначала треугольникъ токовъ AOB при холостой работѣ изъ векторовъ i_0, i_h и i_μ. Если векторъ i_μ будетъ совпадать съ осью абсциссъ, то векторъ индуктируемой электродвижущей силы $E_1 = E_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}$ пойдетъ внизъ по оси ординатъ, такъ какъ индуктируемая электродвижущая сила отстаетъ отъ намагничивающаго тока на 90°.

Слѣдовательно, на фиг. 220

$$OE = E_1 = E_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}.$$

То же направленіе, что E_1 и E_2, имѣетъ также векторъ вторичнаго тока, такъ какъ при безъиндукціонной нагрузкѣ существуетъ равенство фазъ между вторичнымъ напряженіемъ и силою тока. Такъ какъ діаграмма получается изъ діаграммы ампервитковъ, то сила тока вторичной цѣпи откладывается въ масштабѣ, приведенномъ къ условіямъ первичной цѣпи. Такимъ образомъ:

$$OC = \frac{i_2 \cdot \xi_2}{\xi_1}.$$

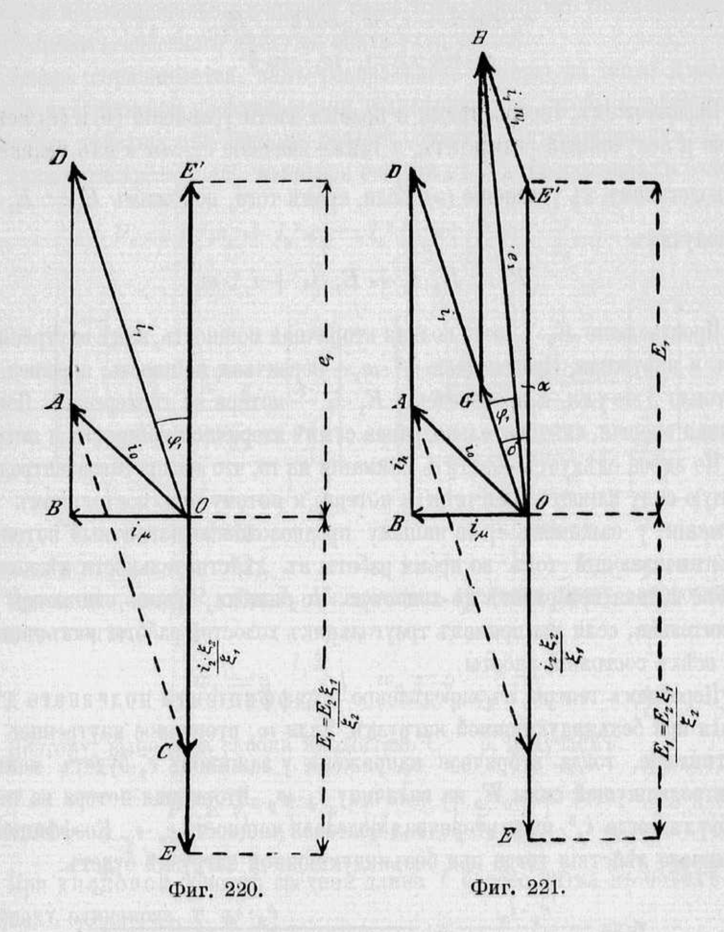
Вышеуказанное положеніе, что токъ холостой работы i_0 является равнодѣйствующимъ изъ первичнаго тока и приведеннаго вторичнаго тока, опредѣляетъ намъ первичный токъ по величинѣ и по фазѣ. Слѣдовательно:

$$OD = i_1.$$

Этотъ векторъ первичнаго тока образуетъ съ первичнымъ напряженіемъ у зажимовъ очень небольшой уголъ φ_1 который на фиг. 220, ради ясности, представленъ въ сравнительно бóльшемъ масштабѣ, чѣмъ въ дѣйствительности. Слѣдовательно, при безъиндукціонной вторичной нагрузкѣ трансформаторъ и въ первичной цѣпи по своей работѣ схожъ съ безъиндукціоннымъ пріемникомъ.

Для учитыванія еще потери напряженія въ первичной цѣпи $i_1 w_1$, проведемъ по направленію первичнаго тока векторъ $i_1 \cdot w_1 = OG$ (фиг. 221).

Далѣе отложимъ отрѣзокъ OE', равный и противоположный по направленію электродвижущей силѣ E_1. Равнодѣйствующая OH изъ векторовъ



Фиг. 220. Фиг. 221.

OG и OE' дастъ намъ тогда первичное напряженіе у зажимовъ e_1 по величинѣ и фазѣ.

Правильность построенія діаграммы повѣряется на основаніи закона сохраненія энергіи.

Первичная сообщаемая мощность, если $\varphi_1 = \delta - \alpha$, будетъ:

$$P_1 = e_1 \cdot i_1 \cdot \cos\varphi_1 = e_1 \cdot i_1 \, (\cos\delta \cdot \cos\alpha + \sin\delta \cdot \sin\alpha) \quad . \quad . \quad . \quad (a)$$

Если, теперь возьмемъ проэкціи векторовъ e_1, $i_1 \cdot w_1$ и i_1 на ось ординатъ, то получимъ:

$$i_1 \cdot \cos\delta = i_2 \cdot \frac{\xi_2}{\xi_1} + i_h \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (b)$$

$$e_1 \cdot \cos\alpha - i_1 \cdot w_1 \cdot \cos\delta = E_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (c)$$

$$e_1 \cdot \sin\alpha = i_1 \cdot w_1 \cdot \sin\delta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (d)$$

Перемножимъ, теперь, лѣвыя и правыя части уравненій (b) и (c) между собою и полученный результатъ, а также значеніе $e_1 \cdot \sin\alpha$ изъ уравненія (d) подставимъ въ уравненіе (a). Если, кромѣ того, положимъ $E_2 = E_1 \cdot \frac{\xi_2}{\xi_1}$, то получимъ:

$$P_1 = E_2 \cdot i_2 + E_1 \cdot i_h + i_1^2 \cdot w_1.$$

Произведеніе $E_2 \cdot i_2$ есть полная вторичная мощность, какъ внутренняя, такъ и наружная. Произведеніе $i_1^2 \cdot w_1$—первичная мощность, перешедшая въ тепло Джоуля, а произведеніе $E_1 \cdot i_h$ — потеря на гистерезисъ. Поглощенная энергія, слѣдовательно, равна суммѣ вторичной мощности и потерь.

Но здѣсь слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что на противоэлектродвижущую силу вліяютъ омическія потери, и потому при постоянномъ напряженіи у зажимовъ e_1 по нашему предположенію магнитный потокъ и намагничивающій токъ во время работы въ дѣйствительности нѣсколько слабѣе потока при работѣ въ-холостую. Но ошибка будетъ слишкомъ незначительна, если мы примемъ треугольникъ холостой работы постояннымъ для всѣхъ состояній работы.

Перейдемъ теперь къ опредѣленію коэффиціента полезнаго дѣйствія при безъиндукціонной нагрузкѣ. Если w_2 вторичное внутреннее сопротивленіе, тогда вторичное напряженіе у зажимовъ e_2 будетъ меньше электродвижущей силы E_2 на величину $i_2 \cdot w_2$. Вторичная потеря на тепло Джоуля тогда $i_2^2 \cdot w$, и вторичная полезная мощность $e_2 \cdot i_2$. Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія тогда при безъиндукціонной нагрузкѣ будетъ:

$$\eta = \frac{e_2 \cdot i_2}{e_1 \cdot i_1 \cdot \cos\varphi_1} = \frac{e_2 \cdot i_2}{e_2 \cdot i_2 + i_1^2 \cdot w_1 + i_2^2 \cdot w_2 + P_h}.$$

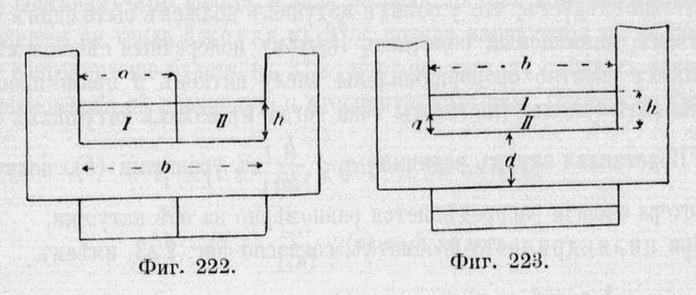
Какъ видно изъ уравненія, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія при незначительной нагрузкѣ очень невеликъ, такъ какъ потеря на гистерезисъ оказываетъ слишкомъ сильное вліяніе. При увеличеніи нагрузки потеря на гистерезисъ идетъ уже менѣе въ счетъ, потери на тепло Джоуля въ началѣ также незначительны въ сравненіи съ полезной мощностью, такъ что

коэффиціентъ полезнаго дѣйствія при увеличеніи нагрузки увеличивается. Онъ будетъ наибольшимъ, когда всѣ перемѣнныя потери на тепло Джоуля станутъ приблизительно равными почти постоянной потерѣ на гистерезисъ. При дальнѣйшемъ увеличеніи нагрузки значеніе потерь на тепло Джоуля, которыя пропорціональны квадрату силы тока, слишкомъ увеличивается, и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія опять ухудшается.

Теперь спрашивается, какъ распредѣлить потерю на тепло Джоуля на обѣ катушки при проэктированіи трансформатора, чтобы коэффиціентъ полезнаго дѣйствія при данномъ объемѣ обмотки былъ наибольшимъ?

Такъ какъ $i_2 = i_1 \xi_1 / \xi_2$, то потеря энергіи въ обѣихъ катушкахъ будетъ:

$$P_v = i_1^2 w_1 + i_2^2 w_2 = i_1^2 \left(w_1 + w_2 \cdot \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2} \right).$$



Фиг. 222. Фиг. 223.

При этомъ, если l_1 или l_2 обозначаютъ среднюю длину одного витка въ метрахъ, то

$$w_1 = \rho \cdot \frac{l_1 \xi_1}{q_1}, \quad w_2 = \rho \frac{l_2 \xi_2}{q_2}.$$

Поэтому, вынося за скобки множитель $\xi_1^2 \cdot \rho$, получаемъ:

$$P_v = i_1^2 \cdot \xi_1^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{l_1}{\xi_1 \cdot q_1} + \frac{l_2}{\xi_2 \cdot q_2} \right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (a)$$

При дисковой обмоткѣ средняя длина l одного витка въ обѣихъ катушкахъ одинакова, т. е.

$$l_1 = l_2 = l.$$

Далѣе, согласно фиг. 222, если предположимъ, что въ обѣихъ катушкахъ пространство, занимаемое изоляціей, въ процентномъ отношеніи будетъ одинаково, независимо отъ постояннаго коэффиціента:

$$\xi_1 \cdot q_1 = a \cdot h. \qquad \xi_2 \cdot q_2 = (b - a)\, h.$$

Согласно этому потеря энергии:

$$P_v = \frac{i_1^2 \cdot \xi_1^2 \cdot \rho \cdot l}{h} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b-a}\right) \cdot \; \cdot \; \cdot \; \cdot \; \cdot \; \cdot \; \cdot \quad \text{(b)}$$

Для опредѣленія условія, когда эта потеря будетъ наименьшей, приравняемъ первую производную по a нулю и, опуская постоянный коэффиціентъ, получаемъ:

$$-\frac{1}{a^2} + \frac{1}{(b-a)^2} = 0$$

или

$$a = \frac{b}{2} \,.$$

Отсюда слѣдуетъ, что у обѣихъ катушекъ долженъ быть одинъ и тотъ же объемъ, занимаемый обмоткою. Поэтому поперечныя сѣченія мѣди въ катушкахъ обратно пропорціональны числу витковъ и прямо пропорціональны силѣ токовъ. Плотность тока тогда въ обѣихъ катушкахъ одинакова. Подставляя затѣмъ величину $a = \frac{b}{2}$ въ уравненіи (b), получаемъ, что потеря энергіи распредѣляется равномѣрно на обѣ катушки.

При цилиндрической обмоткѣ, согласно фиг. 223, имѣемъ:

$$l_2 = (d + a)\,\pi,$$
$$l_1 = [d + 2h - (h - a)] \cdot \pi = (d + h + a)\,\pi,$$
$$q_1 \cdot \xi_1 = b\,(h - a), \quad q_2 \cdot \xi_2 = b \cdot a.$$

Поэтому уравненіе (a) принимаетъ слѣдующій видъ:

$$P_v = \frac{i_1^2 \xi_1^2 \cdot \rho \cdot \pi}{b} \cdot \left[\frac{d + h + a}{(h - a)} + \frac{d + a}{a}\right].$$

Приравнивая первую производную по a нулю и сдѣлавъ приведеніе, получаемъ:

$$a^2 + ad - \frac{h \cdot d}{2} = 0.$$

То же самое уравненіе получилось бы, если приравнять въ послѣднемъ выраженіи для P_v оба слагаемыя другъ другу [1]). Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія снова при данномъ пространствѣ обмотки будетъ наибольшимъ

[1]) См. Капр., Transformatoren, 2 Aufl., стр. 88.

тогда, когда потери распредѣлятся равномѣрно на обѣ катушки. Условіе одинаковыхъ плотностей тока въ данномъ случаѣ не выполняется. Между прочимъ при нашемъ расчетѣ мы совершенно не принимали во вниманіе различное пространство, занимаемое изоляціей. При точномъ опредѣленіи слѣдуетъ принять $q_1 \xi_1 = k_1 Q_1$ и $q_2 \xi_2 = k_2 Q_2$, гдѣ Q_1 и Q_2 суть поперечныя сѣченія пространства обмотокъ. Размѣры величинъ k_1 и k_2 мы имѣемъ возможность установить при помощи вѣроятной потери пространства на изоляцію. Подобнымъ же образомъ средняя длина первичнаго витка на фиг. 223, взятая точно, будетъ $(d + h + a + c) \cdot \pi$, гдѣ c разстояніе между обѣими обмотками. Положимъ, первичное напряженіе у зажимовъ будетъ равно 2 000 вольтъ, сила первичнаго тока 20 амперъ и коэффиціентъ трансформаціи 10 : 1; тогда вторичное напряженіе при холостой работѣ составитъ 200 вольтъ и сила вторичнаго тока 200 амперъ. При потерѣ энергіи на тепло Джоуля въ 3%, потеря напряженія тогда на омическое сопротивленіе будетъ въ 3%, и этотъ расходъ слѣдуетъ распредѣлить равномѣрно на первичную и вторичную катушки. Отсюда получаемъ:

$$i_1 \cdot w_1 = \frac{1{,}5}{100} \cdot 2\,000 = 30 \text{ вольтъ},$$

$$i_2 \cdot w_2 = \frac{1{,}5}{100} \cdot 200 = 3 \text{ вольта}.$$

Отсюда слѣдуетъ:

$$w_1 = \frac{30}{20} = 1{,}5 \text{ ома},$$

$$w_2 = \frac{3}{200} = 0{,}015 \text{ ома}.$$

Мы сдѣлаемъ чрезвычайно малую ошибку, если ради упрощенія сложимъ омическія потери напряженія алгебраически, вмѣсто сложенія геометрическаго.

$$E_1 = e_1 - i_1 w_1 = 1\,970 \text{ вольтъ}.$$

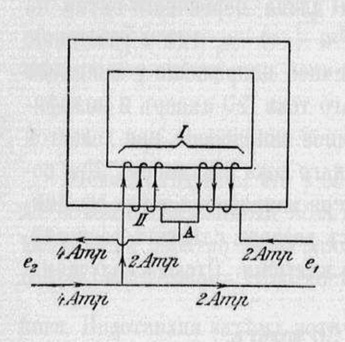
$$E_2 = \frac{E_1}{10} = \frac{1\,970}{10} = 197 \text{ вольтъ}$$

и

$$e_2 = E_2 - i_2 \cdot w_2 = 194 \text{ вольта}.$$

Потери напряженія между холостой работой и работой при полной нагрузкѣ составитъ, слѣдовательно, 200 — 194 = 6 вольтъ или 3%. Для уменьшенія потерь и для экономіи въ мѣди примѣняютъ такъ называемые

автотрансформаторы. Пусть, напримѣръ, на фиг. 224 первичное напряженіе у зажимовъ равно 220 вольтамъ, а во вторичную цѣпь включено 20 лампъ накаливанія, которыя при напряженіи въ 110 вольтъ потребляютъ 0,4 амперъ каждая. Включимъ эти лампы между конечной и средней точками первичной обмотки, т. е. въ напряженіе въ 110 вольтъ. Вторичный токъ тогда будетъ $10 \cdot 0{,}4 = 4$ амперамъ и вторичная отдаваемая мощность составитъ $4 \cdot 110 = 440$ ваттъ. Отсюда притекающій первичный токъ будетъ $\frac{440}{220} = 2$ амперамъ. Этотъ послѣдній въ точкѣ A идетъ непосредственно во вторичную цѣпь. Такъ какъ токъ въ этой цѣпи составляетъ 4 ампера, то изъ вторичной обмотки притекаетъ $4 - 2 = 2$ ампера. Преимущество состоитъ въ этомъ случаѣ въ томъ, что вторичная обмотка работаетъ совмѣстно съ первичной и проходится болѣе слабымъ токомъ чѣмъ при обыкновенномъ трансформаторѣ. Понятно, подобнаго рода схема непримѣнима тамъ, гдѣ одна изъ цѣпей находится подъ высокимъ напряженіемъ. Эта схема включенія особенно пригодна для трансформаторовъ дуговыхъ лампъ и для пусковыхъ трансформаторовъ однофазныхъ трамвайныхъ двигателей. Особенно пригодной является подобнаго рода схема при совершенно неравномѣрной нагрузкѣ сѣти для распредѣленія напряженій. При этомъ необходимо обратить вниманіе на то, что, если даже одна часть сѣти, какъ на фиг. 224, совершенно не нагружена, соотвѣтствующая часть трансформатора совсѣмъ не работаетъ, въ противоположность тому, какъ это бываетъ при включеніи реакціонной катушки.



Фиг. 224.

86. Трансформаторъ при индукціонной нагрузкѣ.

Перейдемъ теперь къ случаю, когда зажимы вторичной обмотки трансформатора соединяются какимъ-либо индуктивнымъ сопротивленіемъ. Если W_2 будетъ омическое, а $L_2\omega$ индуктивное сопротивленіе внѣшней вторичной цѣпи, то сдвигъ фазъ между вторичнымъ напряженіемъ у зажимовъ и силою тока выразится уравненіемъ:

$$tg\varphi_2 = \frac{L_2\omega}{W_2}.$$

Уголъ же сдвига фазъ φ между электродвижущей силой E_2 и силою тока i_2 опредѣлится уравненіемъ:

$$tg\varphi = \frac{L_2\omega}{W_2 + w_2}.$$

Отложимъ на фиг. 225 векторъ OE, равный $\frac{E_2 \cdot \xi_1}{\xi_2}$, и построимъ прямоугольный треугольникъ OME такимъ образомъ, чтобы катетъ OM отставалъ на вышеуказанный уголъ φ отъ гипотенузы. Тогда OM будетъ полное вторичное омическое напряженіе, состоящее изъ внутренняго омическаго паденія напряженія OL и внѣшняго омическаго напряженія LM. Такъ какъ необходимо принять во вниманіе коэффиціентъ трансформаціи, то

$$OM = i_2 (W + w_2) \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}, \qquad OL = i_2 \cdot w_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}.$$

Равнымъ образомъ EM будетъ представлять въ соотвѣтствующемъ масштабѣ самоиндукцію во внѣшней вторичной цѣпи, т. е.

$$EM = L_2\omega \cdot i_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}.$$

Для опредѣленія напряженія у зажимовъ вторичной цѣпи необходимо изъ электродвижущей силы OE вторичной цѣпи геометрически вычесть паденіе напряженія OL.

$$LE = e_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}.$$

Напряженіе у зажимовъ вторичной цѣпи тогда будетъ, какъ указываетъ фигура, гипотенузой треугольника, катетами котораго являются индуктивное и омическое паденія напряженія во внѣшней вторичной цѣпи.

Теперь вычертимъ вторичный и первичный векторы тока. Векторъ вторичнаго тока совпадаетъ съ направленіемъ вторичнаго омическаго напряженія. Отложимъ его въ соотвѣтствующемъ масштабѣ, приведя къ одинаковому числу витковъ; тогда получимъ:

$$OC = \frac{i_2 \cdot \xi_2}{\xi_1}.$$

Затѣмъ проведемъ векторъ OD такъ, чтобы токъ холостой работы OA былъ равнодѣйствующей изъ OD и OC. Тогда векторъ OD представитъ первичную силу тока i_1 по величинѣ и фазѣ, такъ какъ ампервитки при

холостой работѣ являются равнодѣйствующими изъ первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ.

Откладываемъ затѣмъ на векторѣ первичнаго тока омическую потерю напряженія $i_1 w_1 = OG$, а на оси ординатъ напряженіе OE', которое должно преодолѣть первичную электродвижущую силу. Изъ этихъ обоихъ напряженій получаемъ равнодѣйствующую, представляющую первичное напряженіе у зажимовъ $e_1 = OH$. Діаграмма тогда дастъ намъ возможность установить слѣдующія очень важныя положенія:

1. Первичный и вторичный векторы тока направлены почти прямо противоположно другъ другу. Ампервитки при холостомъ ходѣ, слѣдовательно, почти равны алгебраической разности между первичными и вторичными ампервитками. Такъ какъ въ дѣйствительности токъ при холостой работѣ гораздо меньше, чѣмъ въ діаграммѣ, то приближенно опять имѣетъ мѣсто уравненіе:

$$i_1 = \frac{i_2 \cdot \xi_2}{\xi_1}.$$

2. Векторъ напряженій e_1 и e_2 при небольшой омической потерѣ напряженія почти вполнѣ совпадаетъ съ осью ординатъ, слѣдовательно, съ направленіемъ электродвижущей силы.

Сообразно этому уголъ сдвига фазъ φ_2 во внѣшней вторичной цѣпи приблизительно равенъ углу φ_1, углу между напряженіемъ у зажимовъ первичной цѣпи и первичнымъ токомъ. Вторичный сдвигъ фазъ, слѣдовательно, оказываетъ непосредственное воздѣйствіе на первичную цѣпь.

Эти положенія относительно работы трансформатора приводятъ насъ къ воззрѣнію, которое просто и изящно уясняетъ зависимость между первичной и вторичной катушками. При этомъ воззрѣніи мысленно какъ бы устанавливается связь между обѣими катушками, и весь трансформаторъ тогда представляетъ какъ бы одно цѣлое, какъ бы одинъ аппаратъ. Соединительная линія GE на фиг. 225, какъ сторона параллелограмма, равна напряженію у зажимовъ первичной цѣпи e_1. Такъ какъ, затѣмъ, омическія потери напряженія OG и OL составляютъ почти прямую, то онѣ складываются въ одну полную омическую потерю напряженія, и съ достаточнымъ приближеніемъ

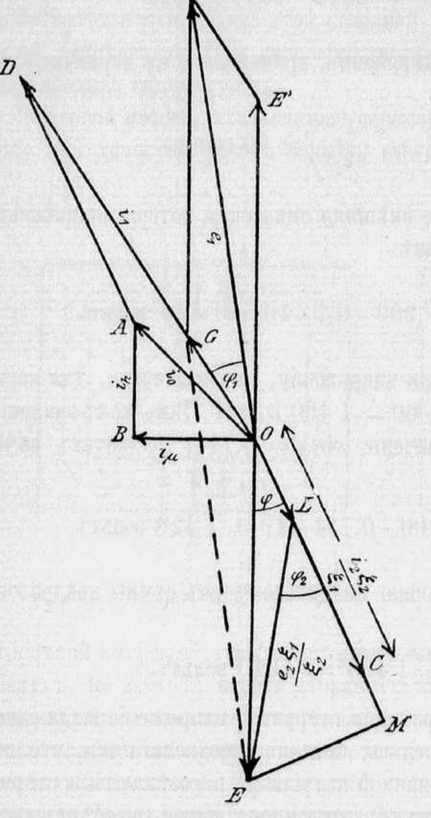
$$GL = OG + OL = i_1 \cdot w_1 + i_2 \cdot w_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}.$$

Подставляя вмѣсто i_2 величину $\frac{i_1 \cdot \xi_1}{\xi_2}$, получаемъ:

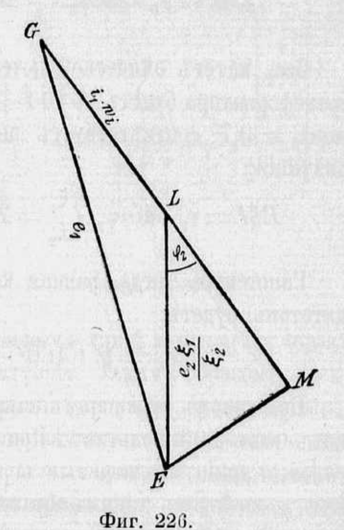
$$GL = i_1 \cdot w_1 + i_1 \cdot w_2 \cdot \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2} = i_1 \cdot \left(w_1 + w_2 \cdot \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2}\right).$$

Изъ этого уравненія вытекаетъ, что первичный токъ какъ бы проходитъ послѣдовательно черезъ сопротивленіе w_1 и сопротивленіе $w_2 \cdot \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2}$.

Послѣднее выраженіе называютъ вторичнымъ сопротивленіемъ, приведеннымъ къ первичной катушкѣ. Отъ всего первоначальнаго напряженія e_1 остается послѣ преодолѣнія всего сопротивленія напряженіе e_2. Весь трансформаторъ тогда по своей работѣ подобенъ генератору съ электродвижущей силой e_1, внѣшнимъ сопротивленіемъ $w_i = w_1 + w_2 \cdot \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2}$ и напряженіемъ у зажимовъ $e_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}$. Для ясности, на фиг. 226 вычерчена соотвѣтствующая діаграмма этого генератора и представлена въ томъ же точно положеніи, которое она занимаетъ въ діаграммѣ трансформатора. Напряженіе e_1 — гипотенуза, одинъ изъ катетовъ GM — сумма внутренняго и внѣшняго омическаго напряженія, а другой EM — внѣшняя самоиндукція. При этомъ внутренняя самоиндукція генератора принимается равною нулю.



Фиг. 225.



Фиг. 226.

Пусть, въ примѣрѣ, приведенномъ въ концѣ предыдущей статьи, коэффиціентъ мощности во внѣшней вторичной сѣти $cos\varphi = 0,7$ и первичная сила тока $i_1 = 20$ амп. Сопротивленія, какъ прежде, $w_1 = 1,5$ и $w_2 = 0,015$ ома и коэффиціентъ трансформаціи 10 : 1. Требуется опредѣлить напряженіе первичной сѣти, которое необходимо для созданія вторичнаго напряженія въ 200 вольтъ. Имѣемъ:

$$w_1 + w_2 \cdot \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2} = 1,5 + 0,015 \cdot 100 = 3 \text{ ома.}$$

Полное внутреннее паденіе напряженія, приведенное къ первичной катушкѣ, будетъ:

$$GL = i_1 \cdot \left(w_1 + w_2 \cdot \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2}\right) = 60 \text{ вольтъ.}$$

Къ этому присоединяется еще внѣшняя омическая потеря напряженія приведенная къ первичной катушкѣ:

$$LM = e_2 \cdot cos\varphi_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2} = 200 \cdot 0,7 \cdot 10 = 1\,400 \text{ вольтъ.}$$

Весь катетъ омической потери напряженіи, слѣдовательно, для всего трансформатора будетъ: $1\,400 + 60 = 1\,460$ вольтъ. Такъ какъ значенію $cos\varphi_2 = 0,7$ соотвѣтствуетъ значеніе $sin\varphi = 0,714$, то катетъ самоиндукціи:

$$EM = e_2 \cdot sin\varphi_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2} = 200 \cdot 0,714 \cdot 10 = 1\,428 \text{ вольтъ.}$$

Гипотенуза тогда, равная корню квадратному изъ суммы квадратовъ катетовъ, будетъ:

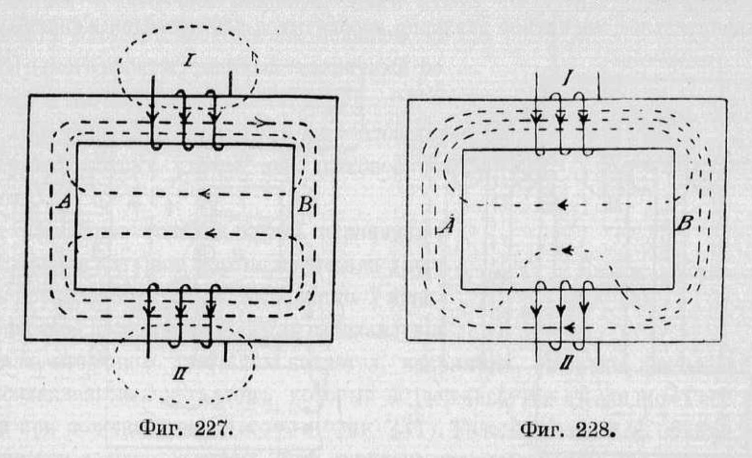
$$e_1 = \sqrt{1\,460^2 + 1\,428^2} = 2\,040 \text{ вольтъ.}$$

При такомъ первичномъ напряженіи вторичное напряженіе тогда равно какъ разъ 200 вольтамъ. При этомъ, конечно, предполагается, что всѣ силовыя линіи, создаваемыя первичной катушкой, пересѣкаютъ и вторичную, и, наоборотъ, такимъ образомъ образуется поле, общее для обѣихъ катушекъ. Въ дѣйствительности же происходитъ нѣкоторое разсѣяніе силовыхъ линій, которое увеличиваетъ при полной нагрузкѣ паденіе напряженія. Въ слѣдующей статьѣ мы увидимъ, что и при этихъ условіяхъ, разсматривая обѣ катушки, какъ одно цѣлое, какъ одинъ аппаратъ, мы придемъ къ очень простымъ результатамъ.

87. Работа трансформатора при разсѣяніи силовыхъ линій.

Въ статьѣ 82 мы сравнивали индуктируемую электродвижущую силу въ первичной катушкѣ съ самоиндукціей реакціонной катушки, но тогда же умышленно отказались отъ термина «самоиндукція» и замѣнили его «противоэлектродвижущей силой». Это было необходимо потому, что въ дѣйствительности, кромѣ этой полезной индуктируемой электродвижущей силы, разсѣивающимися силовыми линіями въ обѣихъ катушкахъ создается еще вредная самоиндукція.

Силовой потокъ, создаваемый первичной катушкой и окружаемый ею, уже при холостой работѣ больше, чѣмъ силовой потокъ, обхватываемый



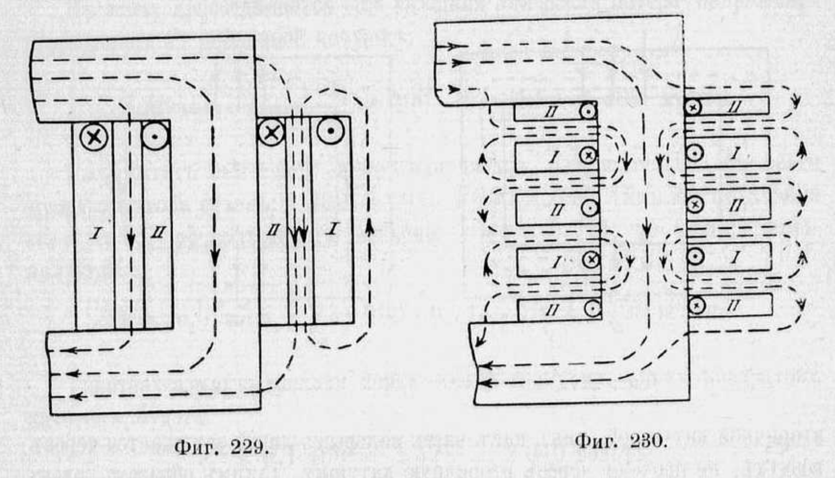
Фиг. 227. Фиг. 228.

вторичной катушкой, такъ какъ часть силовыхъ линій замыкается черезъ воздухъ, не проходя черезъ вторичную катушку. Такимъ образомъ, электродвижущая сила, индуктируемая во вторичной катушкѣ, будетъ меньше, чѣмъ можно было ожидать изъ отношенія витковъ. Мы можемъ это разсматривать такимъ образомъ, что часть всего первичнаго напряженія у зажимовъ расходуется непроизводительно на преодолѣніе электродвижущей силы самоиндукціи, индиктируемой потокомъ разсѣянія. При нагрузкѣ вліяніе разсѣянія значительно увеличивается. Раньше вторичной катушкѣ приписывали свою собственную самоиндукцію, т. е. свой собственный потокъ разсѣянія, какъ это изображено на фиг. 227 для совсѣмъ необычнаго случая, въ которомъ обѣ катушки находятся на разныхъ желѣзныхъ сердечникахъ трансформатора. Но къ болѣе простому разсужденію прихо-

дятъ, когда полагаютъ, что весь потокъ разсѣянія создается первичнымъ токомъ.

Мы должны обратить вниманіе на то, что оба ампервитка при созданіи магнитнаго потока въ желѣзѣ другъ другу противодѣйствуютъ и что полезный потокъ создается избыткомъ дѣйствія первичнаго тока. Отсюда мы получаемъ, изображенное на фиг. 227, направленіе отдѣльныхъ потоковъ, гдѣ мы видимъ, что вторичный потокъ разсѣянія **внутри вторичной катушки** по направленію своему противоположенъ полезному силовому потоку. **Въ дѣйствительности** внутри вторичной катушки существуетъ только разность обоихъ потоковъ и распредѣленіе силовыхъ линій во внѣшнемъ воздушномъ пространствѣ происходитъ согласно указанному на фиг. 228.

При холостой работѣ между точками A и B будетъ существовать только незначительное магнитное давленіе, необходимое для проведенія силовыхъ

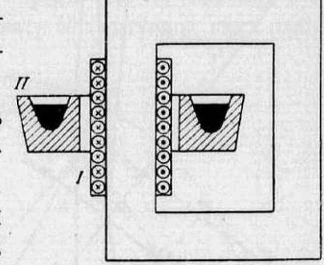


Фиг. 229. Фиг. 230.

линій черезъ желѣзо. При нагрузкѣ, напротивъ, между точками A и B кромѣ этого давленія существуетъ еще большое магнитное давленіе, необходимое для преодолѣнія противодѣйствія вторичныхъ ампервитковъ. Это большое магнитное давленіе прогоняетъ значительное число силовыхъ линій черезъ воздухъ. Послѣднее подобно нагнетанію воды сквозь неплотную трубу. Чѣмъ больше въ этомъ случаѣ противодавленіе, которое препятствуетъ поступательному движенію поршня, тѣмъ больше будетъ выдавливаться воды въ стороны черезъ скважины трубы. Вторичный потокъ утечки на фиг. 228, согласно этому воззрѣнію, будетъ создаваться составляющей первичнаго тока, которая по своему дѣйствію равна и противоположна

вторичному току. Отсюда величина и фаза вторичнаго потока утечки опредѣляются вторичнымъ токомъ. Выражаясь болѣе точно, потокъ утечки въ каждый моментъ и въ каждомъ мѣстѣ создается параллельно дѣйствующими мгновенными значеніями первичной и вторичной магнитодвижущей силы. Для наибольшаго уменьшенія разсѣянія обѣ катушки помѣщаютъ непосредственно одна надъ другой или каждую катушку разбиваютъ на нѣсколько слоевъ, которые размѣщаютъ такимъ образомъ, что каждый слой какой-нибудь обмотки помѣщаютъ между двумя слоями другой. Но все же и въ этомъ случаѣ необходимо считаться съ незначительнымъ паденіемъ напряженія вслѣдствіе самоиндукціи.

На фиг. 229 показанъ видъ потока утечки при цилиндрической обмоткѣ. Въ этомъ случаѣ опять примемъ, что первичная обмотка располагается снаружи и что она создаетъ, какъ это имѣетъ мѣсто въ продолженіе большей части одного періода, главный магнитный потокъ и потокъ утечки.



Фиг. 231.

На фиг. 230 при тѣхъ же условіяхъ указанъ потокъ утечки при дисковой обмоткѣ.

Требуемое условіе, чтобы первичная и вторичная катушки плотно прилегали другъ къ другу, иногда трудно выполнимо. У электрической печи, служащей для расплавленія стали, вторичною катушкою является, напримѣръ, канавка, заполненная расплавленнымъ металломъ, который поддерживается въ жидкомъ состояніи при помощи тепла Джоуля (фиг. 231). Разстояніе между обѣими катушками должно, поэтому, быть довольно значительнымъ. Для того чтобы потеря напряженія на самоиндукцію не выходила изъ допускаемыхъ предѣловъ, необходимо имѣть очень большой полезный силовой потокъ, т. е. большое поперечное сѣченіе желѣза.

Для вычерчиванія **діаграммы векторовъ** въ предположеніи существованіи разсѣиванія, мы пренебрегаемъ токомъ при холостой работѣ вслѣдствіе его незначительной величины [1]) и предполагаемъ, что векторы первичнаго и вторичнаго токовъ направлены другъ другу навстрѣчу. Уголъ между векторомъ i_2 и векторомъ $OE = E_2 \cdot \xi_1/\xi_2$ выбранъ на фиг. 232 произвольно, въ дѣйствительности же онъ зависитъ отъ отношенія полной вторичной самоиндукціи къ полному вторичному сопротивленію. Соотвѣт-

---

1) См. Heyland, *ETZ.* 1904, стр. 60.

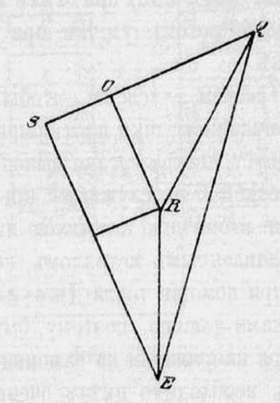
ствующія омическія потери напряженія мы откладываемъ снова вдоль векторовъ тока. Такимъ образомъ:

$$OG = i_1 \cdot w_1,$$

$$OL = i_2 \cdot w_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}.$$

Если мы теперь, слѣдуя прежнему воззрѣнію [1]), положимъ, что каждая катушка обладаетъ особымъ потокомъ утечки, то внутренняя вторичная электродвижущая сила самоиндукціи, создаваемая потокомъ утечки, отстаетъ, согласно стр. 322, на 90° отъ силы тока. Она должна уравновѣшиваться направленной прямо противоположно ей составляющей ON вторичной электродвижущей силы, которая опережаетъ вторичный токъ на 90°. Тогда равнодѣйствующая OR, получающаяся изъ внутренней омической потери напряженія и индуктивной потери напряженія ON, будетъ полной вторичною потерею напряженія. Линія RE представитъ тогда по величинѣ и по фазѣ вторичное напряженіе у зажимовъ. Такимъ образомъ:

Фиг. 232.



Фиг. 233.

$$RE = e_2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}.$$

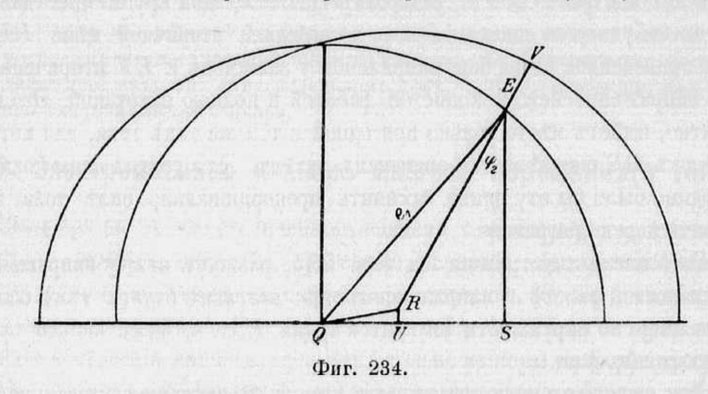
[1]) Точная діаграмма трансформатора будетъ дана при разсмотрѣніи двигателей трехфазнаго тока, въ ст. 123.

Ради ясности, на фиг. 232 векторы потерь напряженія и самоиндукціи отложены въ сравнительно бóльшемъ масштабѣ. Въ дѣйствительности они гораздо меньше, такъ что вторичное напряженіе у зажимовъ очень мало отличается отъ электродвижущей силы.

Слагающая OP первичнаго напряженія, которая уравновѣшиваетъ первичную электродвижущую силу самоиндукціи, опережаетъ векторъ первичнаго тока на 90°. Тогда векторъ OQ представляетъ равнодѣйствующую изъ омической потери напряженія и индуктивной потери напряженія, т. е. полную первичную потерю напряженія. Изъ этого вектора и напряженія OE', уравновѣшивающаго противоэлектродвижущую силу, составляемъ равнодѣйствующую и получаемъ:

$$OH = e_1.$$

Такимъ образомъ всѣ векторы у насъ опредѣлены по величинѣ и по фазѣ, и мы можемъ теперь опять разсматривать обѣ катушки, какъ одинъ



Фиг. 234.

аппаратъ. Для этого мы изъ точекъ R и E опускаемъ перпендикуляры на продолженіе линіи QG. Полученный такимъ образомъ и вычерченный отдѣльно на фиг. 233 треугольникъ QES представляетъ собою треугольникъ напряженія всего трансформатора. Гипотенуза QE, какъ сторона параллелограмма, равна OH, т. е. первичному напряженію у зажимовъ e_1. Отрѣзокъ QU равенъ суммѣ обѣихъ внутреннихъ индуктивныхъ потерь напряженій, а отрѣзокъ RU суммѣ обѣихъ омическихъ потерь напряженія. Тогда отрѣзокъ QR представитъ намъ полную потерю напряженія на все индуктивное сопротивленіе во всемъ трансформаторѣ, тогда какъ вторичное напряженіе у зажимовъ опредѣляется по величинѣ и фазѣ отрѣзкомъ RE. Врядъ ли слѣдуетъ еще упомянуть, что полная внутренняя потеря напряженія въ дѣйствительности значительно меньше отрѣзка QR на фиг. 232 и 233.

Очень важно то, что треугольникъ QRU можно опредѣлить опытнымъ путемъ. Замкнемъ вторичную катушку на короткое, тогда $RE = 0$ и точка E совпадаетъ съ точкою R. При этомъ, понятно, первичное напряженіе должно быть выбрано столь низкимъ, чтобы въ коротко замкнутомъ трансформаторѣ создавался только нормальный токъ. Расходуемое тогда при этомъ опытѣ первичное напряженіе будетъ какъ разъ равно QR. Такъ какъ полное омическое напряженіе опредѣляется по току и сопротивленію или, лучше, изъ потери ваттовъ и напряженія, то построить треугольникъ QRU не представитъ никакого затрудненія.

Этимъ самымъ опредѣляются основанія діаграммы Каппа для трансформаторовъ съ постоянной силой тока и перемѣннымъ внѣшнимъ сдвигомъ фазъ (фиг. 234). Строимъ сначала треугольникъ QRU изъ первичнаго напряженія при короткомъ замыканіи QR и полной омической потери напряженія RU, оба, конечно, при нормальной силѣ тока, и проводимъ затѣмъ изъ центровъ Q и R радіусомъ $QE = e_1$ два круга. Для даннаго какого-нибудь угла сдвига фазъ φ_2 во внѣшней вторичной цѣпи RE будетъ приведенное вторичное напряженіе у зажимовъ и EV вторичное паденіе напряженія между холостой работой и полною нагрузкой. Это все,д понятно, имѣетъ мѣсто только при одной и той же силѣ тока, для которой отрѣзокъ QR опредѣляется опытнымъ путемъ. Для другой силы тока необходимо было бы эту длину измѣнить пропорціонально силѣ тока и построить новую діаграмму.

На основаніи діаграммы, на фиг. 234, разность между напряженіемъ при холостой работѣ и напряженіемъ при нагрузкѣ будетъ тѣмъ больше, чѣмъ ниже по окружности опустится точка E, т. е. чѣмъ больше будетъ уголъ сдвига фазъ φ_2.

При отрицательномъ сдвигѣ фазъ точка E находится близко отъ оси ординатъ или слѣва оси ординатъ. Поэтому вторичное напряженіе у зажимовъ RE при нагрузкѣ будетъ больше напряженія холостой работы QE. Этотъ случай имѣетъ мѣсто тогда, когда во вторичную цѣпь будутъ включены конденсаторы или перевозбужденные двигатели (ср. соотвѣтствующую діаграмму генератора въ ст. 258, а также въ ст. 92 и 106).

ГЛАВА ДВѢНАДЦАТАЯ.

88. Электромагниты и якорь машинъ перемѣннаго тока. — 89. Электродвижущая сила при обмоткѣ съ опредѣленнымъ числомъ каналовъ на фазу и на полюсъ и опредѣленной ширинѣ полюса.—90. Дѣйствующая электродвижущая сила при синусоидальномъ полѣ. — 91. Электродвижущая сила при гладкой обмоткѣ якоря.

88. Электромагниты и якорь машинъ перемѣннаго тока.

Несмотря на то, что съ теченіемъ времени уже выяснилось, что почти во всѣхъ случаяхъ наиболѣе пригодною является обыкновенно машина съ внутренними полюсами, мы считаемъ не лишнимъ все же разсмотрѣть, различные типы машинъ. При этомъ мы не пойдемъ по пути историческаго развитія построенія машинъ, а укажемъ только машины наиболѣе простыя. Кромѣ того, пока однофазныя и многофазныя машины мы будемъ разсматривать заодно, такъ какъ особенности машинъ трехфазнаго тока мы лучше выяснимъ въ связи съ самой теоріей этого тока. Для болѣе яснаго пониманія данной главы мы укажемъ на главную разницу между однофазными и многофазными машинами. Однофазныя машины имѣютъ только одну обмотку. Каждая индуктирующаяся сторона катушки можетъ при этомъ располагаться, какъ указано на фиг. 235, въ одномъ каналѣ, или, какъ на фиг. 236, въ нѣсколькихъ каналахъ. При этомъ передъ каждымъ полюсомъ располагается одна только сторона катушки. Многофазныя машины, наоборотъ, имѣютъ нѣсколько обмотокъ, соединенныхъ извѣстнымъ образомъ и смѣщенныхъ одна относительно другой. Эти обмотки или фазы мы можемъ пока считать разъединенными другъ отъ друга, такъ что двухфазная машина представляетъ собою не что иное, какъ машину

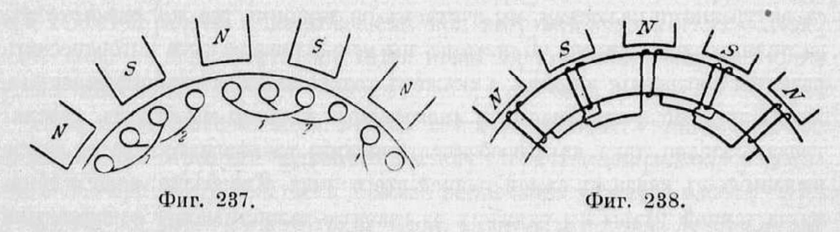
съ двумя однофазными обмотками. Поэтому разсмотримъ пока, напримѣръ, на фиг. 237 только обмотку 1, не обращая вниманія на обмотку 2. Подобнымъ путемъ мы сможемъ въ дальнѣйшемъ разсматривать заодно машины однофазнаго и трехфазнаго токовъ.

Машины съ внѣшними полюсами строились прежде какъ для кольцевой, такъ и для барабанной обмотокъ. У кольцевого якоря, представлен-

Фиг. 235. Фиг. 236.

наго на фиг. 238, всѣ катушки намотаны въ одномъ направленіи, а соединены затѣмъ одна съ другой въ противоположномъ. Если разставить стрѣлки направленія тока, какъ это дѣлали у якоря машины постояннаго тока, на проволокахъ передней торцевой поверхности, и прослѣдить направленіе тока, то найдемъ, что одновременно индуктируемыя электродвижущія силы будутъ складываться.

Машины съ внѣшними полюсами и барабаннымъ якоремъ (фиг. 235), строятся еще и нынѣ для небольшихъ мощностей и большого числа оборотовъ. Теоретически на каждый полюсъ приходится одна индуктирую-

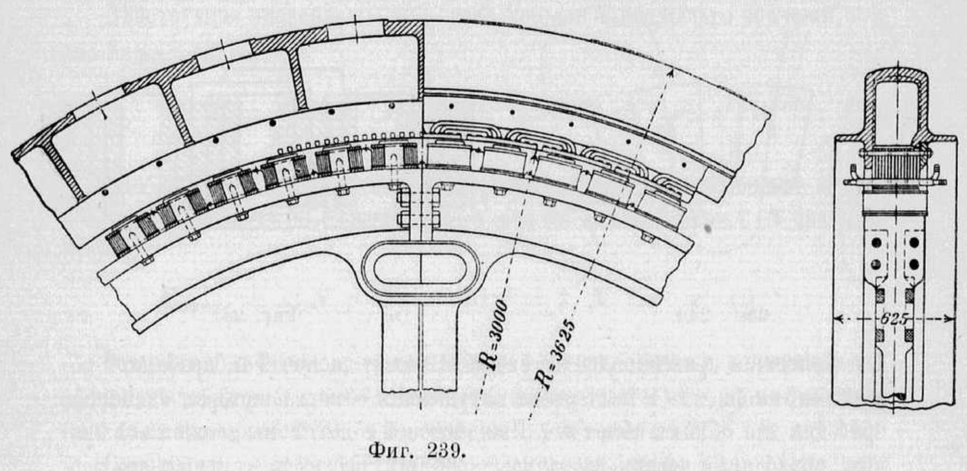


Фиг. 237. Фиг. 238.

щаяся сторона катушки, и наматываніе производится, какъ у якоря постояннаго тока, отъ середины сѣвернаго полюса до середины южнаго полюса. Напримѣръ, на фиг. 235 проволока въ каналѣ 1 идетъ изъ-за плоскости чертежа къ намъ, а въ каналѣ 1′ отъ насъ за плоскость чертежа. Послѣ полной обмотки катушки 1,1′ къ ней присоединяется послѣдовательно при помощи обозначеннаго пунктиромъ и расположеннаго на задней торцевой поверхности соединенія катушка 2,2′.

Машина съ внутренними полюсами (фиг. 239), которая по своей конструкціи и работѣ чрезвычайно проста, вытѣснила съ теченіемъ вре-

мени всѣ другія конструкціи. У этого типа машинъ якорь, составленный изъ тонкихъ листовъ желѣза, стоитъ неподвижно. На внутренней окружности у него имѣются каналы, которые у машинъ высокаго напряженія выложены миканитомъ, у машинъ низкаго напряженія изолирующимъ прессованнымъ картономъ. Обмотка сдѣлана по принципу обыкновенной барабанной обмотки, и концы обмотки идутъ къ закрѣпленнымъ неподвижно зажимамъ, такимъ образомъ въ этомъ случаѣ устраняется необходимость собирать токъ высокаго напряженія при помощи контактныхъ колецъ. Внутри якоря вращаются электромагниты съ чередующимися разноименными полюсами, которые, какъ теперь, вообще за послѣднее время, принято, укрѣпляются



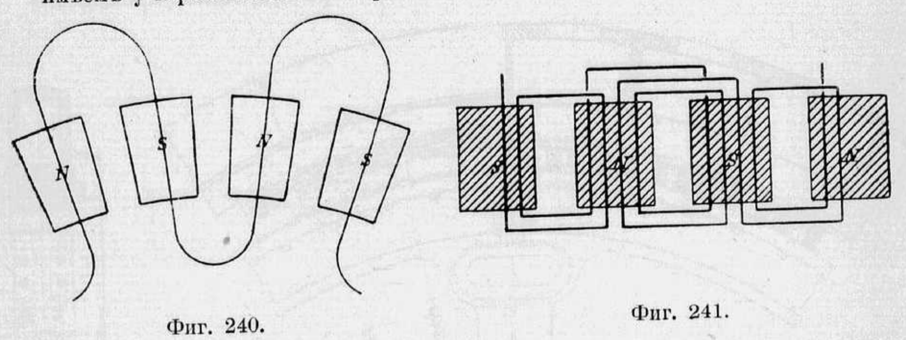
Фиг. 239.

по окружности маховика, служащаго въ качествѣ части, замыкающей магнитную цѣпь. Возбуждающая обмотка у этой машины устраивается изъ намотанной плоскою своею стороною мѣдной ленты. Часто такая обмотка состоитъ изъ плоской мѣдной ленты, которая наматывается на ребро, при чемъ отдѣльные витки изолированы между собою изолирующимъ картономъ или бумагою. Возбуждающій токъ доставляется или машиною постояннаго тока или аккумуляторной батареей и къ электромагнитамъ подводится при помощи щетокъ и контактныхъ колецъ.

До сихъ поръ мы разсматривали машины, имѣющія одинъ только полюсный ободъ, дисковыя же машины обладаютъ двумя полюсными ободами, которые устанавливаются такимъ образомъ, что поверхности полюсовъ неодинаковаго знака располагаются другъ противъ друга. У болѣе старой машины Ферранти (фиг. 240) между полюсными поверхностями двухъ полюсныхъ ободовъ вращалась узкая волнообразно расположенная мѣдная

лента. Изображенные на фигурѣ полюсы расположены, слѣдовательно, за плоскостью фигуры, а передъ нею находится вторая система полюсовъ, устанавливаемая такимъ образомъ, что разноименные полюсы приходятся другъ противъ друга. Общее правило, по которому обмотку ведутъ сначала вдоль передъ сѣвернымъ полюсомъ и затѣмъ возвращаются обратно передъ сосѣднимъ южнымъ полюсомъ, здѣсь особенно очевидно. Обмотка въ этой машинѣ утрачиваетъ свой катушечный характеръ и становится совершенно волнообразной.

Подобнаго рода систему полюсовъ, но съ дисковыми катушками мы имѣемъ у первыхъ машинъ перемѣннаго тока фирмы Сименсъ и Гальске.



Фиг. 240. Фиг. 241.

Для выясненія принципіальнаго сходства между дисковой и барабанной обмотками, на фиг. 241 вычерчена катушечная обмотка, которая одинаково пригодна для обѣихъ обмотокъ. При дисковой обмоткѣ мы должны всѣ прямыя, проходящія черезъ середины полюсовъ, изогнуть въ плоскости чертежа, какъ на фиг. 240, въ видѣ окружностей и передъ плоскостью фигуры вообразить еще второй полюсный ободъ. Но мы можемъ, съ другой стороны, ту же фиг. 241 принять также за развернутую боковую поверхность барабана, при чемъ полюсы, индуктируемые въ желѣзѣ якоря, противолежатъ электромагнитамъ, расположеннымъ за плоскостью фигуры.

Для того, чтобы электродвижущія силы въ отдѣльныхъ катушкахъ (фиг. 241) складывались, необходимо катушки соединить послѣдовательно въ обратномъ порядкѣ. При этомъ необходимо обратить вниманіе на то, что при вычерченной обмоткѣ двѣ отдѣльныя индуктирующіяся стороны различныхъ катушекъ располагаются передъ полюсомъ одна подлѣ другой. Эти стороны, слѣдовательно, будутъ одинаково индуктироваться и образуютъ общую индуктирующую сторону катушки съ двойнымъ числомъ проволокъ.

89. Дѣйствующая электродвижущая сила при синосуидальномъ полѣ.

Предполагая, что напряженіе поля вдоль по боковой поверхности якоря является синусоидальной функціей положенія вращающейся части и что всѣ проволоки расположены въ одномъ каналѣ, мы получаемъ наибольшую электродвижущую силу, согласно стр. 302, равною:

$$E_{max} = \pi \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Дѣйствующе значеніе въ $\sqrt{2}$ раза меньше наибольшаго значенія, т. е. оно будетъ равно:

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8} = 2{,}22 \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}. \quad (55)$$

Наоборотъ, среднее значеніе электродвижущей силы, такъ какъ z' проволокъ пересѣкаетъ въ теченіе одного періода силовой потокъ N два раза будетъ:

$$E_{среднее} = 2 \cdot N \cdot p \cdot \frac{n}{60} \cdot z' \cdot 10^{-8} = 2 \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Отношеніе дѣйствующаго значенія къ среднему значенію называютъ коэффиціентомъ формы кривой. Послѣдній зависитъ отъ вида кривой магнитнаго поля и рода обмотки, и въ нашемъ случаѣ равенъ $2{,}22 : 2 = 1{,}11$.

Опредѣлимъ теперь дѣйствующую электродвижущую силу также и для другихъ условій и напишемъ поэтому уравненіе (55) въ самомъ общемъ его видѣ:

$$E = k \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Въ обмоткѣ, при которой на фазу и на полюсъ приходится нѣсколько каналовъ, электродвижущая сила при одинаковомъ числѣ всѣхъ проволокъ нѣсколько меньше электродвижущей силы въ обмоткѣ, при которой на фазу и на полюсъ приходится только одинъ каналъ. Послѣднюю мы получимъ при синусоидальномъ полѣ очень просто, если опредѣлимъ на основаніи уравненія (55) электродвижущую силу для каждаго изъ различно расположенныхъ каналовъ въ отдѣльности. Полученныя величины мы должны будемъ затѣмъ, принимая во вниманіе разстояніе между каналами, сложить по параллелограмму силъ.

Пусть, напримѣръ, при синусоидальномъ полѣ и при обмоткѣ съ двумя каналами на полюсъ и на фазу разстояніе между каналами составитъ

треть полюснаго дѣленія. Полюсное дѣленіе пусть соотвѣтствуетъ дугѣ π. Полная электродвижущая сила получится, слѣдовательно, въ видѣ равнодѣйствующей двухъ отдѣльныхъ электродвижущихъ силъ, смѣщенныхъ относительно другъ друга на дугу $\pi/3$, и для которыхъ число проволокъ для каждой равно $z'/2$. Каждая отдѣльная электродвижущая сила тогда, согласно уравненію (55), будетъ:

$$E' = 1{,}22 \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot \frac{z'}{2} \cdot 10^{-8}.$$

Если теперь двѣ равныя смѣщенныя относительно другъ друга на дугу $\pi/3$ электродвижущія силы E' сложимъ по параллелограмму силъ, то получимъ $2 \cdot \cos\frac{\pi}{6} \cdot E' = 1{,}73 E'$. Электродвижущая сила всего якоря, слѣдовательно, будетъ:

$$E = 1{,}73 \cdot E' = 1{,}92 \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Особенно интересенъ теперь случай, когда индуктирующіяся стороны катушки распредѣлены въ столькихъ каналахъ, что эта обмотка станетъ равнозначуща гладкой обмоткѣ. Этотъ случай все равно можно разсмотрѣть здѣсь, хотя онъ имѣетъ мѣсто скорѣе у электродвигателей трехфазнаго тока, чѣмъ у машинъ однофазнаго тока. Въ этомъ случаѣ мы имѣемъ дѣло съ вращающимся почти синуисоидальнымъ полемъ и обмоткой съ нѣсколькими каналами на полюсъ и на фазу, которая почти равнозначуща гладкой обмоткѣ.

Разложимъ всю ширину 2γ индуктирующейся стороны катушки на безконечно малыя части шириною $d\varphi$, такъ какъ по всей ширинѣ 2γ передъ всѣми полюсами всего располагается число проволокъ z', то на ширинѣ $d\varphi$ укладывается проволокъ:

$$\frac{d\varphi}{2\gamma} \cdot z'.$$

Разсмотримъ теперь тотъ моментъ, когда середина индуктирующейся стороны катушки находится въ наиболѣе сильномъ полѣ, когда, стало быть, индуктируется во всей этой сторонѣ наибольшая электродвижущая сила. Въ такой небольшой частицѣ, находящейся въ наиболѣе сильномъ полѣ, согласно стр. 303, индуктируется наибольшая величина въ пространствѣ:

$$\pi \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot \frac{d\varphi}{2\gamma} \cdot z' \cdot 10^{-8}$$

Въ какой-нибудь части, удаленной на уголъ φ электродвижущая сила въ разсматриваемый моментъ будетъ:

$$\pi \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot \frac{d\varphi}{2\gamma} \cdot z' \cdot 10^{-8} \cdot \cos\varphi .$$

Полная электродвижущая сила въ разсматриваемый моментъ будетъ:

$$E_{max} = \frac{\pi}{2\gamma} \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot z' \cdot 10^{-8} \int_{-\gamma}^{+\gamma} \cos\varphi \, d\varphi = \pi \cdot \frac{\sin\varphi}{\gamma} \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot z' \cdot 10^{-8} .$$

Такимъ образомъ, электродвижущая сила всей катушки будетъ синусоидальной функціей времени, такъ какъ въ каждомъ отдѣльномъ узкомъ отрѣзкѣ она является синусоидальной функціей, и сумма различныхъ синусоидальныхъ функцій есть синусоидальная функція. Дѣйствующее значеніе составитъ 0,707 наибольшаго значенія; поэтому оно будетъ равно:

$$E = 2{,}22 \cdot \frac{\sin\gamma}{\gamma} \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} z' \cdot 10^{-8} .$$

Положимъ, ширина индуктирующейся стороны катушки у трехфазнаго двигателя съ трехфазной катушечной обмоткой составляетъ $^1/_3$ дѣленія; тогда:

$$2\gamma = \frac{\pi}{3} ,$$

$$\frac{\sin\gamma}{\gamma} = \frac{0\ 5}{\pi/6} = \frac{3}{\pi} ,$$

и мы получаемъ:

$$E = 2{,}22 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} z' \cdot 10^{-8} = 2{,}12 \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot z' \cdot 10^{-8} \quad . \ (56)$$

Для ширины индуктирующейся стороны катушки, равной $^2/_3$ полюснаго дѣленія, что имѣетъ мѣсто при трехфазной обмоткѣ винтомъ, получаемъ:

$$2\,\gamma = \frac{2}{3}\pi ,$$

$$\sin\gamma = \sin\frac{\pi}{3} = 0{,}866 ,$$

и отсюда:

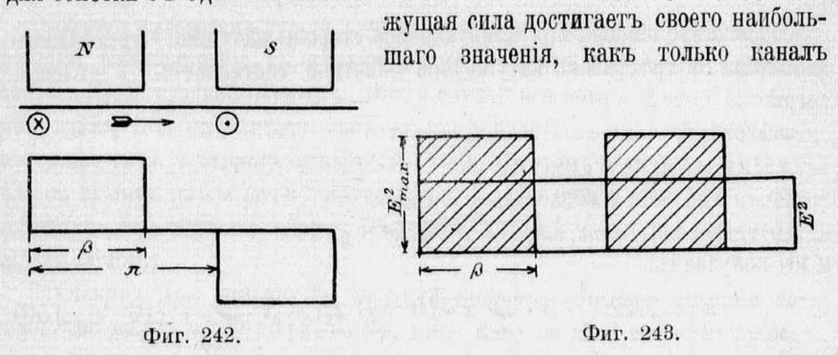
$$E = 2{,}22 \cdot \frac{0{,}866}{\pi/3} \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot z' \cdot 10^{-8} = 1{,}84 \cdot \boldsymbol{N} \cdot \mathfrak{B} \cdot z' \cdot 10^{-8} . \ (57)$$

Уравненія (56) и (57) окажутся особенно пригодными при разсмотрѣніи двигателей трехфазнаго тока, тогда какъ для генераторовъ трехфазнаго и просто перемѣннаго тока болѣе важное значеніе для насъ будутъ имѣть уравненія слѣдующей статьи.

90. Электродвижущая сила при опредѣленномъ числѣ каналовъ на полюсъ и на фазу и при опредѣленной ширинѣ полюса.

Въ предыдущей статьѣ мы всюду принимали поле синусоидальнымъ, теперь же положимъ, что напряженіе поля въ предѣлахъ полюсной дуги повсюду постоянно и на концахъ полюсовъ внезапно падаетъ до нуля. Кривая электродвижущей силы представляетъ собою тогда рядъ прямоугольниковъ. Въ дѣйствительности же, конечно, закругленіе полюсовъ и вліяніе самоиндукціи приближаетъ ее по формѣ къ синусоидѣ. Опредѣляемыя ниже чисто теоретически величины получаются на 10⁰/₀ больше, чѣмъ въ дѣйствительности. Вообще всѣ слѣдующіе выводы приведены здѣсь какъ примѣры упражненій.

На фиг. 242 вычерчена теоретическая кривая электродвижущей силы для обмотки съ однимъ каналомъ на полюсъ и на фазу. Электродвижущая сила достигаетъ своего наибольшаго значенія, какъ только каналъ



Фиг. 242. Фиг. 243.

якоря вступаетъ въ предѣлы полюса, и удерживаетъ эту величину все то время, пока каналъ находится въ предѣлахъ полюса. Для опредѣленія этого максимальнаго значенія раздѣлимъ число пересѣкаемыхъ передъ всѣмъ полюсомъ силовыхъ линій на продолжительность перемѣщенія. Если N магнитный потокъ одного полюса и z' число послѣдовательно включенныхъ проводниковъ, то передъ полюсомъ происходитъ пересѣченіе $N \cdot z'$ силовыхъ линій. Если, затѣмъ, отношеніе дуги полюса къ полюсному дѣленію будетъ равно $\beta : \pi$, то, согласно фиг. 242, получимъ:

дуга π будетъ проходится во время $\dfrac{1}{2\sim}$,

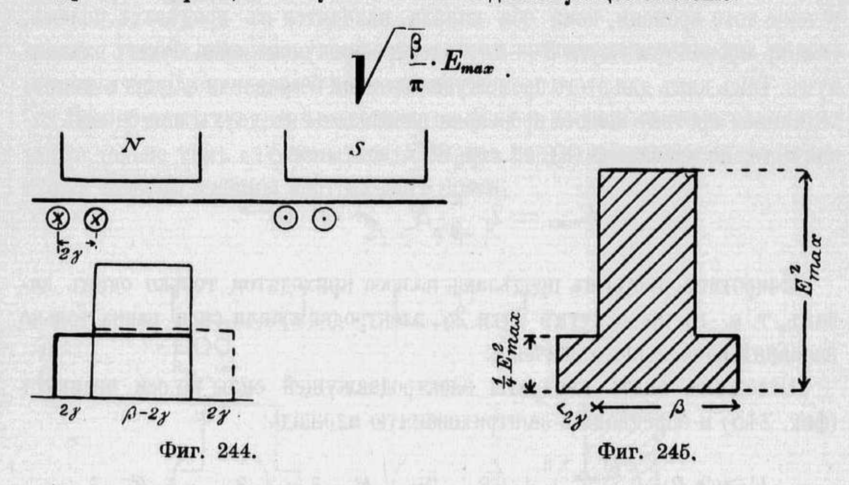
» β » » » » $\dfrac{1}{2\sim} \cdot \dfrac{\beta}{\pi}$.

Слѣдовательно, наибольшее значеніе электродвижущей силы будетъ:

$$E_{max} = \frac{N \cdot z' \cdot 10^{-8}}{\dfrac{1}{2\sim} \cdot \dfrac{\beta}{\pi}} = 2\frac{\pi}{\beta} \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8} \ldots \ldots \text{(a)}$$

Отложимъ теперь, какъ это сдѣлано на фиг. 243, квадраты электродвижущей силы по оси ординатъ и замѣнимъ заштрихованныя поверхности однимъ прямоугольникомъ, построеннымъ на основаніи 2π. Высота этого прямоугольника будетъ $\frac{\beta}{\pi} \cdot E_{max}^2$. Если извлечемъ изъ этого выраженія квадратный корень, то получимъ искомое дѣйствующее значеніе:

$$\sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \cdot E_{max}.$$



Фиг. 244. Фиг. 245.

Положимъ, напримѣръ, что отношеніе длины полюсной дуги къ полюсному дѣленію составляетъ $\frac{\beta}{\pi} = \frac{2}{3}$; тогда получаемъ:

$$E_{max} = 3 \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}$$

отсюда дѣйствующее значеніе

$$E = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot E_{max} = 2{,}45\, N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Если уменьшить, теперь, эти величины, какъ выше было указано, на 10⁰/₀, то получимъ, для обмотки съ однимъ каналомъ на полюсъ и на фазу при отношеніи $\frac{\beta}{\pi} = \frac{2}{3}$, почти тѣ же значенія, что и при синусоидальномъ полѣ.

При обмоткѣ съ двумя каналами на полюсъ и на фазу, ширина индуктирующейся стороны катушки 2γ равна разстоянію между каналами (фиг. 244). Ради упрощенія разсмотримъ только постоянно встрѣчающійся на практикѣ случай, именно, когда разстояніе между каналами меньше нейтральнаго пояса. Если полюсное дѣленіе соотвѣтствуетъ дугѣ π, ширина полюса дугѣ β, то нейтральный поясъ будетъ соотвѣтствовать $\pi - \beta$, и поэтому въ разсматриваемомъ случаѣ:

$$2\gamma < \pi - \beta.$$

Кривая электродвижущей силы составляется изъ двухъ прямоугольниковъ, которые смѣщены одинъ относительно другого на отрѣзокъ 2γ. Въ теченіе того времени, пока оба канала находятся въ предѣлахъ полюса, т. е. въ промежуткѣ дуги $\beta - 2\gamma$, электродвижущая сила будетъ максимумъ. Такъ какъ для этого промежутка времени безразлично, будутъ ли приходящіяся противъ полюса проволоки размѣщены въ двухъ или одномъ каналѣ, то, по уравненію (а), на стр. 385, получаемъ:

$$E_{max} = 2 \cdot \frac{\pi}{\beta} \cdot N \cdot \mathfrak{v} \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Напротивъ, когда въ предѣлахъ полюса приходится только одинъ каналъ, т. е. въ промежуткѣ дуги 2γ, электродвижущая сила равна только половинѣ наибольшаго значенія.

Отложимъ опять квадраты электродвижущей силы по оси ординатъ (фиг. 245) и опредѣлимъ заштрихованную площадь:

$$F = 2 \cdot 2\gamma \cdot \left(\frac{E_{max}}{2}\right)^2 + \left(\beta - 2\gamma\right) \cdot E_{max}{}^2 = \left(\beta - \gamma\right) \cdot E_{max}{}^2.$$

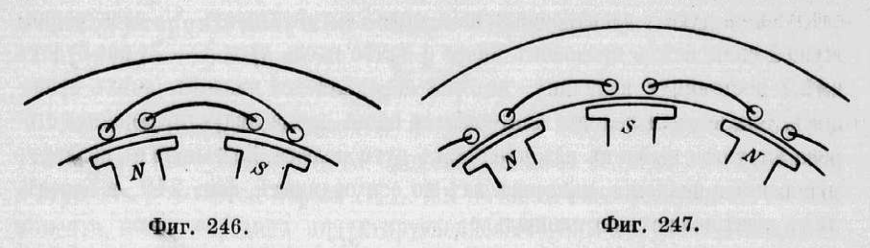
Дѣля эту площадь на основаніе π и извлекая изъ полученнаго результата квадратный корень, получимъ отыскиваемое дѣйствующее значеніе:

$$E = \sqrt{\frac{\beta}{\pi} - \frac{\gamma}{\pi}} \cdot E_{max}.$$

Это уравненіе одинаково пригодно для обмотокъ какъ для фиг. 246, такъ и фиг. 247. Представленная на фиг. 246 часть обмотки можетъ считаться за одну катушку съ двумя каналами на индуктирующуюся сторону[1]) и число такихъ катушекъ на якорѣ будетъ p. На фиг. 247, наоборотъ,

[1]) Вслѣдствіе индуктированія одинаково направленныхъ электродвижущихъ силъ въ двухъ рядомъ лежащихъ у полюсовъ проволокъ. Ред.

имѣется $2p$ отдѣльныхъ катушекъ, стороны которыхъ размѣщены каждая въ отдѣльномъ каналѣ. Но для расчета необходимо и фиг. 247 разсматривать, какъ обмотку съ двумя каналами на полюсъ и на фазу съ p индуктирующимися сторонами. Понятно, обмотка въ этомъ случаѣ должна произ-

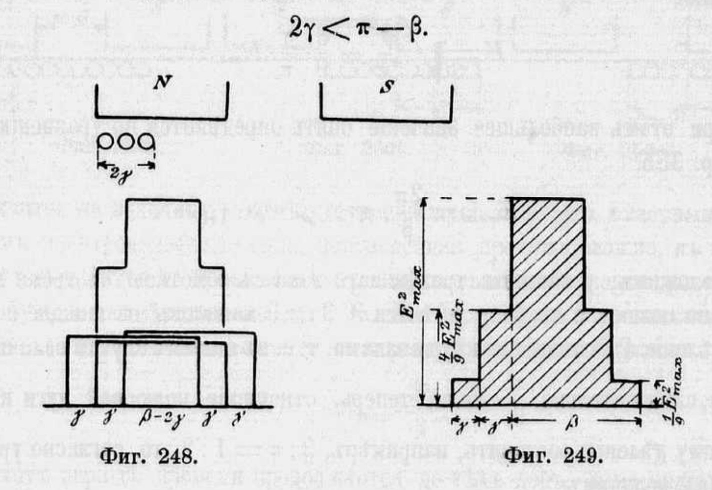


Фиг. 246. Фиг. 247.

водится такимъ образомъ, чтобы проволоки проходили черезъ два рядомъ лежащіе канала въ одномъ направленіи[1]).

При обмоткѣ съ тремя каналами на фазу и на полюсъ мы ограничимся также только тѣмъ случаемъ, когда ширина индуктирующейся стороны катушки меньше ширины нейтральнаго пояса:

$$2\gamma < \pi - \beta.$$



Фиг. 248. Фиг. 249.

Кривая электродвижущей силы получится просто, если на фиг. 248 сложимъ ординаты трехъ кривыхъ, разность фазъ которыхъ соотвѣтствуетъ разстоянію между каналами или половинѣ ширины катушки. Ради ясности, на фиг. 248 ординаты трехъ кривыхъ вычерчены не совсѣмъ одинаковой длины.

[1]) Для этого необходимо вести обмотку, пропуская каждый разъ по одному каналу. Ред.

Въ первый моментъ, когда въ предѣлахъ полюсной дуги приходится только одинъ каналъ, электродвижущая сила соотвѣтствуетъ только третьей части проволокъ якоря. Этотъ моментъ продолжается вдоль дуги γ, если 2γ снова будетъ вся ширина индуктирующейся стороны катушки. Вдоль слѣдующей дуги γ электродвижущая сила соотвѣтствуетъ $^2/_3$ электродвижущей силы всѣхъ проволокъ якоря и далѣе вдоль дуги $\beta - 2\gamma$ она будетъ имѣть постоянную величину, которая опредѣляется числомъ всѣхъ проволокъ. Оба первыя явленія повторяются вновь, когда индуктирующаяся сторона катушки выйдетъ изъ предѣловъ дуги полюса. Возвышая въ квадратъ мгновенныя значенія, нанесемъ ихъ по оси ординатъ, фиг. 249, и опредѣлимъ заштрихованную площадь:

$$F = 2\gamma \cdot \left(\frac{E_{max}}{3}\right)^2 + 2\gamma \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot E_{max}\right)^2 + (\beta - 2\gamma) \cdot E_{max}{}^2.$$

Сдѣлаемъ, теперь, приведеніе подобныхъ членовъ, раздѣлимъ на π и извлечемъ квадратный корень. Тогда получимъ искомое нами дѣйствующее значеніе:

$$E = \sqrt{\frac{\beta}{\pi} - \frac{8}{9} \cdot \frac{\gamma}{\pi}} \cdot E_{max}.$$

При этомъ наибольшее значеніе опять опредѣлится по уравненію (a), на стр. 385.

$$E_{max} = \frac{2\pi}{\beta} \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Положимъ, у машины трехфазнаго тока съ обмоткою съ тремя каналами на полюсъ и на фазу имѣется $3 \cdot 3 = 9$ каналовъ на каждое полюсное дѣленіе. Разстояніе между каналами, т. е. въ нашемъ случаѣ величина γ, равно, слѣдовательно, $\frac{\pi}{9}$. Если, теперь, отношеніе полюсной дуги къ полюсному дѣленію составить, напримѣръ, $\beta : \pi = 1 : 2$, то, согласно уравненію (a), получимъ:

$$E_{max} = \frac{2 \cdot 2}{1} \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8} = 4 \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Отсюда дѣйствующее значеніе E, согласно вышеуказанному уравненію, будетъ:

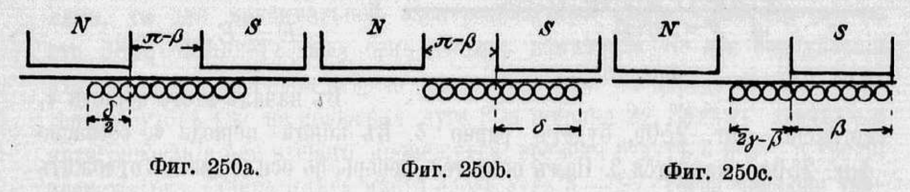
$$E = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{8}{9} \cdot \frac{1}{9}} \cdot E_{max} = 2{,}53 \cdot N \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

91. Электродвижущая сила при гладкой обмоткѣ якоря.

Разсмотримъ здѣсь сначала случай, когда ширина индуктирующейся стороны катушки больше ширины полюсной дуги:

$$2\gamma > \beta.$$

Въ этомъ случаѣ въ моменты наибольшей индукціи (фиг. 250c), катушка сама выступаетъ изъ-за предѣловъ полюса и тогда не ширина 2γ, а отрѣзокъ β является мѣрою E_{max}. Мы начнемъ наше разсужденіе съ того момента, когда середина индуктирующейся стороны катушки совпадаетъ съ нейтральной линіей (фиг. 250a). Тогда передъ обоими полюсами будутъ индуктироваться точно уравновѣшивающія другъ друга электродвижущія силы. Электродвижущая сила индуктирующейся стороны катушки въ этотъ моментъ будетъ, поэтому, равна нулю. Когда, затѣмъ, катушка перемѣстится на дугу α, то электродвижущая сила передъ южнымъ полюсомъ



Фиг. 250a. Фиг. 250b. Фиг. 250c.

увеличится на величину, соотвѣтствующую дугѣ α. Передъ сѣвернымъ полюсомъ электродвижущая сила, направленная противоположно, въ то же время уменьшится на ту же величину. Отсюда увеличеніе электродвижущей силы будетъ соотвѣтствовать дугѣ 2α. Такъ какъ дуга β является мѣрою для E_{max}, то мгновенное значеніе электродвижущей силы будетъ:

$$E = E_{max} \cdot \frac{2\alpha}{\beta}.$$

Этотъ періодъ времени продолжается до тѣхъ поръ, пока индуктирующаяся сторона катушки не выйдетъ изъ района сѣвернаго полюса (фиг. 250b).

Обозначимъ величину, на которую индуктирующаяся сторона катушки шире нейтральнаго пояса, черезъ δ, тогда изъ фиг. (250b) имѣемъ:

$$\delta = 2\gamma - (\pi - \beta) = 2\gamma + \beta - \pi.$$

Путь, на который индуктирующаяся сторона катушки перемѣстится въ первый періодъ времени, согласно фиг. 250a, будетъ равенъ $\delta/2$. Нане-

семъ квадраты электродвижущихъ силъ по оси ординатъ и опредѣлимъ площадь F_1, фиг. 251. Она будетъ:

$$E_1 = \int_0^{\frac{\delta}{2}} E_{max}{}^2 \cdot \left(\frac{2\alpha}{\beta}\right)^2 d\alpha = \frac{E_{max}{}^2 \cdot \delta^3}{6 \cdot \beta^2}.$$

Второй періодъ времени находится между моментами, представленными на фиг. 250b и 250c. Онъ опредѣляется тѣмъ, что индуктирующаяся сторона катушки отчасти перекрывается какимъ-либо полюсомъ. Обозначимъ, теперь, величину, на которую индуктирующаяся сторона катушки вступаетъ въ предѣлы полюсной дуги, черезъ ε; тогда общее выраженіе мгновеннаго значенія электродвижущей силы во время второго періода будетъ:

$$E = E_{max} \cdot \frac{\varepsilon}{\beta}.$$

Фиг. 251.

Въ началѣ этого періода ε, согласно фиг. 250b, будетъ равно δ. Въ концѣ періода ε, согласно фиг. 250c, равняется β. Намъ остается, теперь, по оси ординатъ отложить квадраты мгновенныхъ значеній и проинтегрировать между предѣлами $\varepsilon = \delta$ и $\varepsilon = \beta$. Тогда получимъ площадь F_2, фиг. 251:

$$F_2 = \int_{\delta}^{\beta} E_{max}{}^2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{\beta^2} \cdot d\varepsilon = \frac{E_{max}{}^2 \cdot (\beta^3 - \delta^3)}{3\beta^2}.$$

Въ третій періодъ вся полюсная дуга перекрывается индуктирующейся стороной катушки и электродвижущая сила повсюду достигаетъ своего наибольшаго значенія. Этотъ промежутокъ продолжается, согласно фиг. 250c, вдоль дуги $2\gamma - \beta$. Отложивъ квадратъ электродвижущей силы по оси ординатъ, получаемъ:

$$F_3 = E_{max}{}^2 \cdot (2\gamma - \beta).$$

На фиг. 251 площади вычерчены съ нѣкоторымъ промежуткомъ между ними, такъ какъ начала координатъ для отдѣльныхъ интеграловъ не совпадаютъ. Сумма всѣхъ площадей будетъ:

$$2F_1 + 2F_2 + F_3 = E_{max}{}^2 \cdot \left(2\gamma - \frac{\beta}{3} - \frac{\delta^3}{3\beta^2}\right).$$

Дѣля на π и извлекая корень квадратный, получаемъ дѣйствующее значеніе:

$$E = E_{max} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\pi} - \frac{\beta}{3\pi} - \frac{\delta^3}{3\beta^2 \cdot \pi}} \quad . \quad (2\gamma > \beta) \quad . \quad . \quad (58)$$

Это уравненіе имѣетъ мѣсто въ предположеніи, что ширина индуктирующейся стороны катушки больше ширины полюса. Поэтому мы должны величину E_{max} въ уравненіи (a), на стр. 385, уменьшить въ отношеніи $\beta : 2\gamma$, такъ какъ изъ всего числа проволокъ противъ полюса во время максимума приходится только $\beta/2\gamma$ часть. Слѣдовательно, для индуктирующей стороны катушки, которая шире полюса, мы, принимая во вниманіе уравненіе (a) на стр. 385, получаемъ:

$$E_{max} = \frac{\pi}{\gamma} \cdot N \cdot \Phi \cdot z' \cdot 10^{-8} \quad . \quad . \quad (2\gamma > \beta).$$

Наоборотъ, если индуктируемая сторона катушки меньше ширины полюса, то для максимальной электродвижущей силы уравненіе (a), на стр. 385, сохраняетъ силу безъ всякихъ измѣненій. Но при опредѣленіи дѣйствующаго значенія мѣрою для наибольшей электродвижущей силы теперь будетъ уже не полюсная дуга β, а ширина 2γ. Затѣмъ предѣлами интегрированія для второго промежутка времени будутъ δ и 2γ, а третій промежутокъ будетъ имѣть мѣсто вдоль дуги $\beta - 2\gamma$. Тогда, подобно указанному выше, будетъ:

$$E = E_{max} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{\pi} - \frac{2\gamma}{3\pi} - \frac{\delta^3}{12\gamma^2 \cdot \pi}} \quad . \quad (2\gamma < \beta) \quad . \quad . \quad (59)$$

Какъ уже упоминалось, наибольшее значеніе опредѣляется теперь непосредственно изъ уравненія (a), стр. 385.

Если ширина 2γ индуктирующей стороны катушки будетъ меньше даже ширины нейтральнаго пояса, тогда изъ уравненія для δ на стр. 389, мы получимъ отрицательное значеніе δ. Мы должны въ этомъ случаѣ въ уравненіе для E принять δ равнымъ нулю. Доказательствомъ этого можетъ послужить просто то, что въ этомъ случаѣ площадь F_1 будетъ равна нулю, а площадь F_2 необходимо вычислять между предѣлами 0 и 2γ. Оба эти условія будутъ выполнены, если δ примемъ равнымъ нулю.

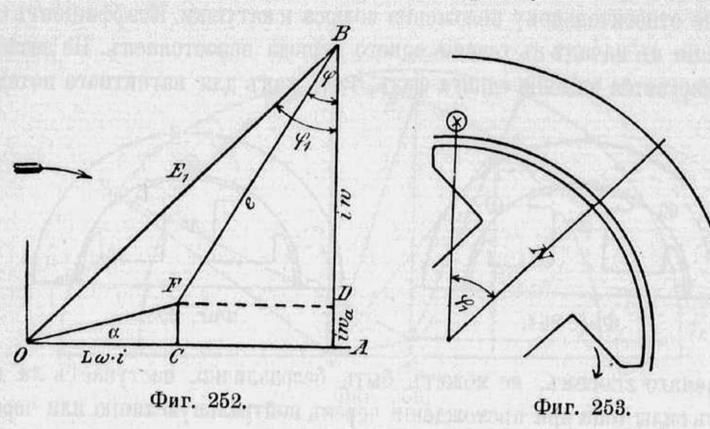
О примѣненіи данныхъ уравненій для преобразователей см. ст. 20.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

92. Діаграмма напряженій.

При предположеніи, что коэффиціентъ самоиндукціи машины при различныхъ состояніяхъ работы имѣетъ постоянную величину, діаграмма машины перемѣннаго тока получается чрезвычайно простою. Электродвижущая сила E_1, индуктируемая магнитнымъ потокомъ, будетъ гипотенузой прямоугольнаго треугольника, однимъ катетомъ котораго является сумма внутренней и внѣшней индуктивной потери напряженія, а другимъ сумма внутренняго и внѣшняго омическаго напряженія. На фиг. 252 векторъ тока идетъ по положительному направленію оси ординатъ. Самоиндукція отстаетъ отъ тока на 90° и уравновѣшивается противоположно ей направленной слагающей OA электродвижущей силы. Отрѣзокъ OA, въ свою очередь, распадается на два: на внутреннее индуктивное паденіе напряженія $OC = L\omega . i$ и на внѣшнее CA. Подобнымъ же образомъ распадается полное омическое напряженіе AB на омическую потерю напряженія AD въ якорѣ и на омическую потерю напряженія DB во внѣшней цѣпи. Для опредѣленія напряженія у зажимовъ строимъ прямоугольникъ $CFDA$. Прямая FB представитъ напряженіе у зажимовъ машины, такъ какъ она будетъ гипотенузой у катетовъ: внѣшнихъ индуктивной и омической потерь напряженій. Далѣе OF представитъ полную потерю напряженія въ машинѣ. Уже въ статьѣ 75 указывалось, что для полученія напряженія у зажимовъ e, нужно это послѣднее вычитать изъ электродвижущей силы не алгебраически, а геометрически.

Уголъ FBD представляетъ собою уголъ сдвига фазъ φ между напряженіемъ у зажимовъ и силою тока, слѣдовательно, уголъ сдвига фазъ во внѣшней цѣпи. Наоборотъ, уголъ φ_1 представляетъ собою уголъ сдвига фазъ между электродвижущей силой, индуктированной магнитнымъ потокомъ, и силой тока. Для уясненія себѣ значенія этого угла на фиг. 253 полюсъ представленъ какъ разъ въ тотъ моментъ, когда электродвижущая сила достигаетъ своего наибольшаго значенія. Если бы сдвигъ фазъ былъ равенъ нулю, то этотъ максимумъ совпадалъ бы съ тѣмъ моментомъ, когда середина полюса находилась бы передъ проволокой. Но въ дѣйствительности максимумъ силы тока получается на уголъ φ_1 спустя послѣ того, какъ середина полюса пройдетъ проволоку. Само собою понятно, что изображенный на діаграммѣ уголъ φ_1, только при двухполюсной машинѣ ра-



Фиг. 252. Фиг. 253.

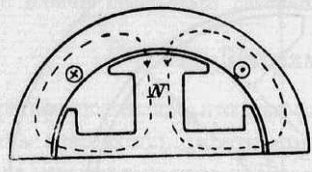
венъ углу, проходимому полюсомъ въ пространствѣ. При многополюсныхъ машинахъ съ p парами полюсовъ, уголъ діаграммы вообще соотвѣтствуетъ въ p разъ меньшему углу пространства.

Чтобы вычертить діаграмму фиг. 252, необходимо знать характеристику холостого хода и коэффиціентъ самоиндукціи машины. Характеристику мы можемъ легко опредѣлить опытнымъ путемъ, измѣняя намагничивающій токъ посредствомъ измѣненія регулировочнаго сопротивленія или измѣняя напряженіе возбуждающей машины. Затѣмъ наносимъ возбуждающій токъ или число ампервитковъ, приходящееся на пару полюсовъ, по оси абсциссъ, а напряженіе при холостомъ ходѣ по оси ординатъ. Это напряженіе тогда равно электродвижущей силѣ машины.

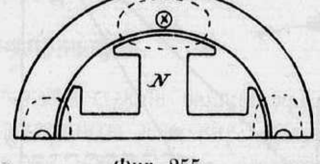
Подобнымъ путемъ получаемъ статическую характеристику (фиг. 268). Въ началѣ эта послѣдняя поднимается прямолинейно вверхъ, пока магнитный потокъ, а вмѣстѣ съ нимъ и насыщеніе желѣза невелико, ибо въ

это время во всей магнитной цѣпи междужелѣзное пространство играетъ самую главную роль, и порождаемый магнитный потокъ и электродвижущая сила пропорціональны возбуждающимъ ампервиткамъ. Но какъ только, вслѣдствіе увеличенія насыщенія, магнитная проницаемость пути сквозь желѣзо уменьшится, кривая станетъ все болѣе и болѣе пологою.

Статическая характеристика можетъ быть опредѣлена или опытнымъ путемъ или путемъ расчета, на основаніи ст. 57. Необходимо еще опредѣлить внутреннюю самоиндукцію. Для этого мы положимъ вначалѣ, что положеніе якоря передъ полюсами не вызываетъ никакого существеннаго измѣненія потока самоиндукціи, порождаемаго якоремъ. Но фиг. 254 и 255 указываютъ намъ, что магнитное сопротивленіе для магнитнаго потока, порождаемаго якоремъ и изображеннаго на фигурѣ пунктиромъ, различно, смотря по относительному положенію полюса и катушки. Коэффиціентъ самоиндукціи въ началѣ въ теченіе одного періода непостояненъ. Но затѣмъ онъ подвергается вліянію сдвига фазъ, такъ какъ для магнитнаго потока,



Фиг. 254.

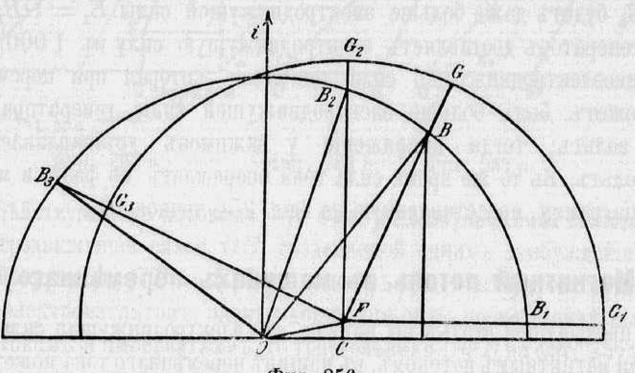


Фиг. 255.

создаваемаго якоремъ, не можетъ быть безразлично, наступаетъ ли максимумъ силы тока при прохожденіи черезъ нейтральную линію или черезъ середину полюса.

Пренебрегая этимъ, мы сможемъ опредѣлить самоиндукцію опытнымъ путемъ, если приложимъ напряженіе перемѣннаго тока къ якорю машины, находящейся въ покоѣ. Это напряженіе выбирается лишь такой незначительной величины, что заставляетъ пройти сквозь якорь только токъ нормальной силы. При болѣе значительныхъ машинахъ этотъ опытъ иногда довольно опасенъ, такъ какъ магнитный потокъ, создаваемый якоремъ, пересѣкаетъ обмотку электромагнитовъ при полномъ числѣ періодовъ и вызываетъ въ нихъ напряженія опасныхъ размѣровъ. Но на это мы не будемъ здѣсь обращать вниманіе, такъ какъ нашей задачей является наиболѣе простое выясненіе явленій. Если мы, затѣмъ, пренебрежемъ незначительной омической потерей напряженія, то напряженіе, приложенное къ якорю, будетъ равно индуктивному расходу напряженія. Если, затѣмъ, раздѣлимъ его на силу тока, то получимъ индуктивную потерю напряженія $L\omega$.

Опредѣливъ такимъ образомъ характеристику холостого хода и индуктивную потерю напряженія въ якорѣ мы можемъ для извѣстнаго даннаго возбужденія предварительно опредѣлить напряженіе у зажимовъ при опредѣленномъ расходѣ тока. Коэффиціентъ мощности $\cos\varphi$ внѣшней цѣпи долженъ быть также указанъ. Мы отыскиваемъ для этого изъ статической характеристики для даннаго возбужденія электродвижущую силу E_1 и изъ O проводимъ радіусомъ $OB = E_1$ окружность (фиг. 256). Затѣмъ строимъ изъ $CF = i \cdot w_a$ и $OC = L\omega \cdot i$ треугольникъ OFC. Далѣе, чтобы построить діаграмму для опредѣленнаго коэффиціента мощности во внѣшней цѣпи $\cos\varphi$, проводимъ изъ F векторъ, образующій съ осью ординатъ уголъ φ и пересѣкающій окружность въ точкѣ B. Тогда FB, согласно фиг. 252, будетъ искомое напряженіе у зажимовъ. Алгебраи-



Фиг. 256.

ческая разность $OB - FB$ представитъ намъ паденіе напряженія у зажимовъ между холостымъ ходомъ и заданной нагрузкой. Чтобы удобнѣе было эту разность отсчитывать, проводимъ изъ F радіусомъ $FG = E_1$ вторую окружность, которая пересѣчетъ продолженіе FB въ точкѣ G. Тогда BG будетъ искомое паденіе напряженія. Какъ показываетъ фигура, это паденіе напряженія будетъ тѣмъ больше, чѣмъ ниже по окружности опустится точка B, чѣмъ больше, стало быть, будетъ уголъ φ.

Это паденіе напряженія достигаетъ своего наибольшаго значенія тогда, когда сдвигъ фазъ будетъ равенъ 90° (фиг. 256). Въ этомъ случаѣ внѣшнее омическое напряженіе равно нулю, а напряженіе у зажимовъ FB_1 равно внѣшней индуктивной потерѣ напряженія. Внутренняя потеря напряженія OF вычитается теперь почти алгебраически изъ электродвижущей силы OB_1 и напряженіе у зажимовъ достигаетъ своей наименьшей величины.

Кромѣ того, фиг. 256 указываетъ также, что паденіе напряженія между холостымъ ходомъ и полной нагрузкой будетъ особенно мало, когда машина будетъ нагружена только лампочками накаливанія и когда вслѣдствіе этого сдвигъ фазъ во внѣшней цѣпи будетъ равенъ нулю.

Напряженіе у зажимовъ FB_2 въ этомъ случаѣ равно внѣшней омической потерѣ напряженія и внѣшній индуктивный расходъ напряженія равенъ 0.

Не менѣе интереснымъ также представляется еще тотъ случай, когда сдвигъ фазъ во внѣшней цѣпи будетъ отрицательнымъ. Тогда векторъ тока i опережаетъ векторъ FB_3 напряженія у зажимовъ. Это можетъ случиться, когда въ цѣпь будутъ включены емкость или перевозбужденный синхронный двигатель. При этихъ условіяхъ напряженіе у зажимовъ $e = FB_3$ будетъ даже больше электродвижущей силы $E_1 = OB_3$. Положимъ, генераторъ доставляетъ электродвижущую силу въ 1 000 вольтъ, а противоэлектродвижущая сила двигателя, которая при перемѣнномъ токѣ можетъ быть больше электродвижущей силы генератора, равна 1 200 вольтъ; тогда напряженіе у зажимовъ устанавливается въ 1 100 вольтъ. Въ то же время сила тока опережаетъ по фазѣ, и мы получаемъ діаграмму, представленную на фиг. 256 точкою B_3.

93. Магнитный потокъ въ машинахъ перемѣннаго тока.

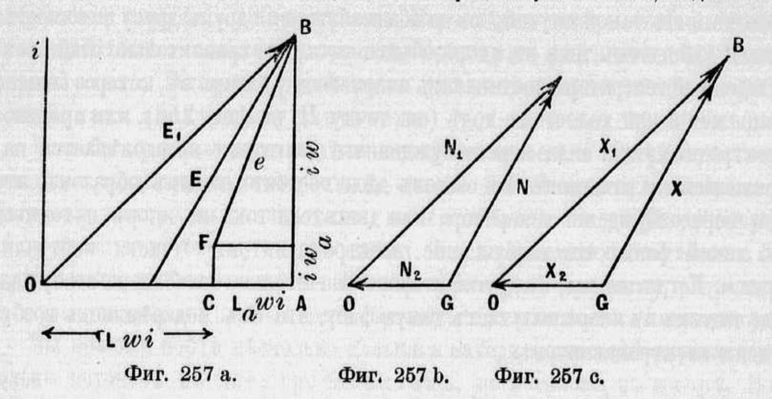
Въ предыдущей статьѣ мы видѣли, что электродвижущая сила, индуктируемая магнитнымъ потокомъ, въ машинѣ перемѣннаго тока можетъ существенно разниться отъ напряженія у зажимовъ. Это объясняется не столько небольшою омическою потерей напряженія, сколько большею индуктивною потерей напряженія, которая затрачивается на преодолѣніе электродвижущей силы самоиндукціи.

Не совсѣмъ правильно предполагать, что въ якорѣ имѣются двѣ электродвижущія силы, изъ которыхъ одна равна напряженію при холостомъ ходѣ, а другая — самоиндукціи якоря. Въ дѣйствительности силовые потоки, создаваемые токомъ возбужденія и токомъ въ якорѣ, не существуютъ въ отдѣльности, но слагаются въ одинъ общій силовой потокъ, который создаетъ общую равнодѣйствующую электродвижущую силу.

На фиг. 257а пусть, напримѣръ, $OC = L\omega \cdot i$ будетъ полною индуктивною потерей напряженія. Часть ея OG пойдетъ на преодолѣніе электродвижущей силы, индуктируемой противодѣйствующими силовыми линіями якоря, которыя, согласно фиг. 258, замыкаются черезъ электромагниты. Другая часть GC, которую мы обозначимъ черезъ $L_s\omega \cdot i$, бу-

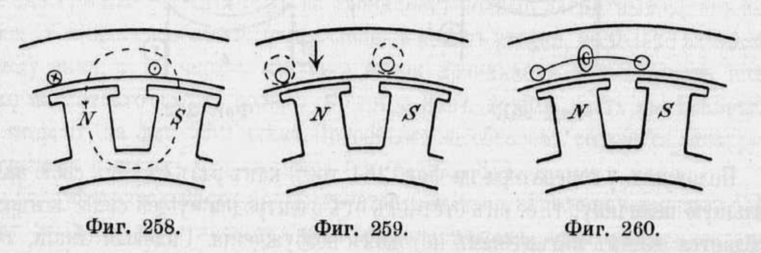
детъ создаваться представленными на фиг. 259 разсѣяніемъ потока въ каналахъ и на фиг. 260 разсѣяніемъ потока съ лицевой поверхности якоря. Мы можемъ тогда GC обозначить какъ паденіе напряженія вслѣдствіе разсѣянія.

Принимая во вниманіе правило о направленіи векторовъ, указанное на стр. 314, мы увидимъ, что GO будетъ электродвижущей силой, создаваемой



Фиг. 257 a. Фиг. 257 b. Фиг. 257 c.

противодѣйствующимъ потокомъ. Эта электродвижущая сила складывается съ электродвижущей силой OB. создаваемой однимъ возбужденіемъ, въ равнодѣйствующую $GB = E$. Такъ какъ въ общей цѣпи, состоящей изъ якоря и электромагнитовъ, электродвижущія силы пропорціональны силовымъ потокамъ и ампервиткамъ, то треугольники OGB на фиг. 257a, 257b и 257c подобны и на фиг. 257b



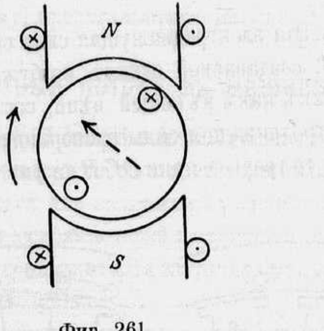
Фиг. 258. Фиг. 259. Фиг. 260.

OB равно магнитному потоку, создаваемому одними электромагнитами,
GO » » » » однимъ только якоремъ,
GB » равнодѣйствующему магнитному потоку въ электромагнитахъ.

На фиг. 257c вмѣсто магнитныхъ потоковъ введены соотвѣтствующіе ампервитки. Фиг. 257b и 257c должны были бы быть, согласно стр. 332, повернуты на 90° относительно фиг. 257a, но ради ясности этимъ сдвигомъ

мы пренебрегли. Мы, конечно, не должны отдѣльныя діаграммы накладывать другъ на друга, мы можемъ самое большее, какъ на фиг. 263, ихъ прикладывать, такъ какъ онѣ представляютъ различные по времени моменты одного и того же состоянія работы.

На фиг. 257c векторъ противодѣйствующихъ ампервитковъ X_2 якоря по направленію значительно противоположенъ вектору возбужденія X_1. Но можетъ быть такой случай, когда оба возбужденія другъ другу помогаютъ. Этимъ дѣйствіемъ тока въ якорѣ объясняется, что сравнительно слабо возбужденный генераторъ доставляетъ напряженіе у зажимовъ, которое больше напряженія при холостомъ ходѣ (см. точку B_3 на фиг. 256), или противоэлектродвижущая сила перевозбужденнаго двигателя преодолѣвается напряженіемъ у зажимовъ. Въ общемъ дѣло обстоитъ такимъ образомъ, что при перевозбужденіи генератора или двигателя токъ въ якорѣ находится въ такой фазѣ, что возбужденіе электромагнитовъ отчасти нейтрализуется. Когда же мы, съ другой стороны значительно ослабляемъ возбужденіе, то токъ въ якорѣ получаетъ такую фазу, что онъ подкрѣпляетъ возбужденіе электромагнитовъ.



Фиг. 261.

Фиг. 262.

Положимъ у генератора на фиг. 261 токъ какъ разъ имѣетъ свою наибольшую величину, т. е. онъ отстаетъ отъ электродвижущей силы, которая создается однимъ магнитнымъ потокомъ возбужденія. Силовыя линіи, создаваемыя якоремъ, ослабляютъ при этомъ главный магнитный потокъ. Слѣдовательно, потокъ отстающій по фазѣ отъ электродвижущей силы противодѣйствуетъ ампервиткамъ возбужденія и имѣетъ мѣсто при перевозбужденіи генератора.

На фиг. 262, наоборотъ, представленъ случай, когда токъ генератора достигаетъ своего наибольшаго значенія, прежде чѣмъ проводникъ пройдетъ середину полюса. Намъ вовсе не нужно обращаться къ силовымъ

линіямъ, создаваемымъ якоремъ, мы видимъ и безъ того, что ампервитки якоря и электромагнитовъ другъ другу помогаютъ. Слѣдовательно, токъ опережающій по фазѣ появляется при неполномъ возбужденіи генератора.

Для двигателя мы имѣемъ при токахъ того же направленія вращеніе обратное, по сравненію съ генераторомъ, поэтому на фиг. 261 имѣетъ мѣсто опереженіе, а на фиг. 262 отставаніе. Мы можемъ теперь обобщить: Отстающій токъ ослабляетъ поле генератора и усиляетъ послѣднее у двигателя. Опережающій токъ усиляетъ поле генератора и ослабляетъ послѣднее у двигателя.

Если бы проницаемость желѣза электромагнитовъ не зависѣла отъ возбужденія, то діаграмма ампервитковъ давала бы тѣ же результаты, что и діаграмма электродвижущихъ силъ, и мы прибѣгали бы къ результирующему магнитному потоку только потому, что діаграмма соотвѣтствовала бы тогда больше дѣйствительности. На самомъ же дѣлѣ практика, ради точнаго расчета машины принуждаетъ обращаться къ діаграммѣ ампервитковъ.

Мы можемъ пойти нѣсколько дальше и находить равнодѣйствующую не только потоковъ въ электромагнитахъ, но потоковъ въ якорѣ. Потокомъ утечки якоря создается электродвижущая сила CG фиг. 257a, а равнодѣйствующимъ потокомъ, создаваемымъ возбуждающимъ токомъ и токомъ въ якорѣ, индуктируется электродвижущая сила GB. Обѣ эти электродвижущія силы даютъ равнодѣйствующую CB, которая соотвѣтствуетъ дѣйствительному силовому потоку въ якорѣ. Предположимъ, что на фиг. 259 потокъ утечки якоря имѣетъ направленіе, указанное стрѣлкой, тогда во внутрь катушки якоря не проникаетъ полный магнитный потокъ полюса N и противоположно направленный потокъ утечки, но только разность между ними, т. е. черезъ катушку якоря проникаетъ только часть полнаго магнитнаго потока полюса N, тогда какъ другая часть вытѣсняется въ сторону, на фиг. 259 влѣво. Подобнымъ же образомъ создается электромагнитами и потокъ утечки якоря (см. статью 87).

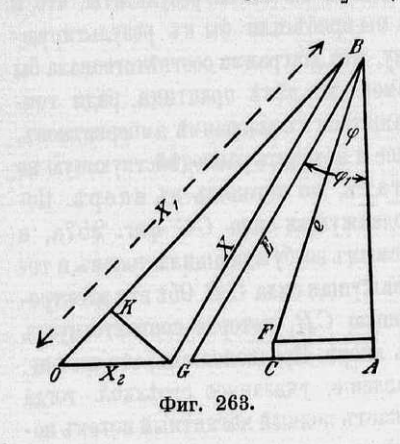
Въ дѣйствительности индуктируется только электродвижущая сила CB (фиг. 257a), и это становится наиболѣе очевиднымъ, если мы параллельно къ обмоткѣ якоря наложимъ вспомогательную обмотку одинаковаго числа витковъ, въ которую включимъ только вольтметръ. Этотъ послѣдній измѣритъ намъ не электродвижущую силу OB, и не GB, а только CB. Слѣдовательно, строго говоря, совершенно неправильно считать, что напряженіе у зажимовъ и электродвижущая сила машины перемѣннаго тока значительно разняться другъ отъ друга. Обѣ отличаются другъ отъ друга только на омическое паденіе напряженія. Вышеуказанный

парадоксъ, по которому электродвижущая сила генератора меньше напряженія у зажимовъ, или противодѣйствующая сила двигателя можетъ быть больше напряженія у зажимовъ, справедливъ только условно.

94. Опредѣленіе реакціи якоря.

Путемъ приложенія фиг. 257а къ фиг. 257с получаемъ фиг. 263. Пусть перпендикуляръ, опущенный изъ точки G на OB, образуетъ съ прямой GO уголъ φ_1. Тогда $KO = X_2 sin\varphi_1$. Такъ какъ KB почти равно GB, слѣдовательно, равно X, то имѣемъ:

$$OK = X_2 sin\varphi_1 = X_1 - X \quad \text{(a)}$$

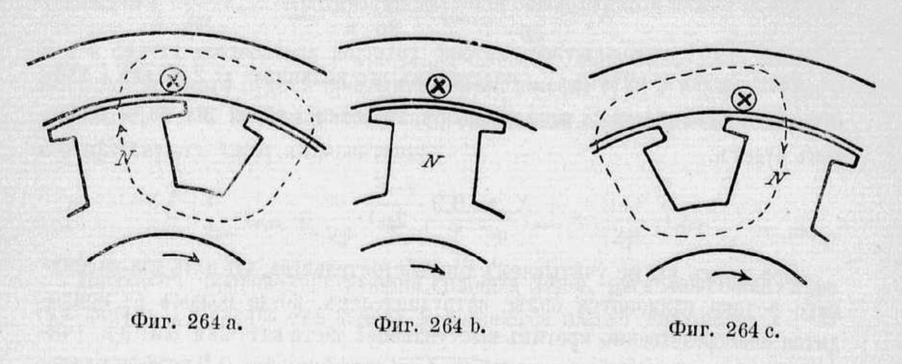


Фиг. 263.

OK является такимъ образомъ слагающей ампервитковъ якоря, на которое результирующее возбужденіе X меньше, чѣмъ возбужденіе электромагнитовъ при холостой работѣ. Если уголъ φ_1 будетъ равенъ нулю, то векторъ электродвижущей силы, индуктируемой исключительно одними электромагнитами совпадетъ съ осью ординатъ. Слѣдовательно, наибольшее значеніе этой электродвижущей силы совпадаетъ съ наибольшимъ значеніемъ силы тока (фиг. 264b). При этомъ токъ въ якорѣ въ этотъ моментъ не создаетъ никакихъ силовыхъ линій, которыя замыкаются черезъ весь магнитный остовъ. Наоборотъ, возростающій токъ создаетъ, согласно фиг. 264а, потокъ, который усиляетъ магнитное поле. Равнымъ образомъ слабѣющій токъ согласно фиг. 264с, создаетъ потокъ, который ослабляетъ магнитное поле. Такъ какъ время ослабленія равновелико времени усиленія, то токъ въ якорѣ въ данномъ случаѣ не производитъ никакого въ конечномъ счетѣ размагничивающаго дѣйствія.

Если, наоборотъ, токъ отстаетъ по своей фазѣ, т. е. φ_1 становится положительнымъ, то онъ, согласно фиг. 261, преодолѣваетъ размагничивающее дѣйствіе. Когда же токъ по своей фазѣ опережаетъ, то уголъ φ_1 будетъ отрицательнымъ. Мы получаемъ тогда изъ уравненія (а) отрицательное противодѣйствіе, т. е. намагничивающее дѣйствіе тока въ якорѣ, согласно фиг. 262.

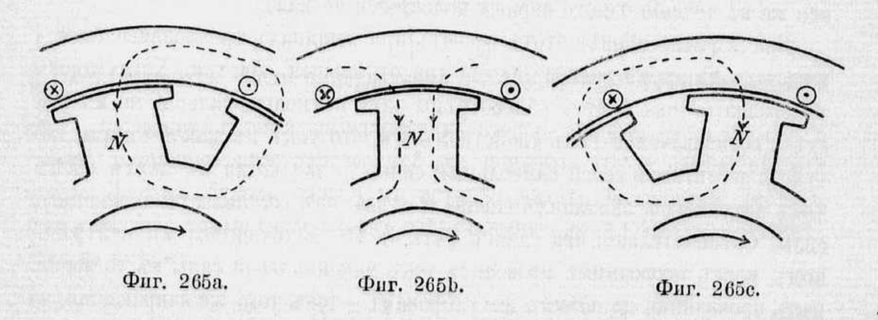
Накопецъ, разсмотримъ случай, когда сдвигъ фазъ будетъ составлять 90°, т. е. токъ будетъ достигать своего наибольшаго значенія, когда индуктирующая сторона катушки якоря будетъ находиться въ нейтральномъ поясѣ (фиг. 265b). Въ этомъ случаѣ $sin\varphi_1$ равенъ единицѣ, и реакціи якоря до-



Фиг. 264 a. Фиг. 264 b. Фиг. 264 c.

стигаетъ своего наибольшаго значенія X_2. Токъ въ якорѣ въ этотъ моментъ, какъ это видно по обозначенному пунктирными линіями потоку, противодѣйствуетъ возбужденію электромагнитовъ.

Пусть z' обозначаетъ число включенныхъ послѣдовательно проволокъ якоря, тогда число проволокъ на индуктирующуюся сторону катушки будетъ $\frac{z'}{2p}$. Это въ то же время число ампервитковъ якоря на пару полю-



Фиг. 265a. Фиг. 265b. Фиг. 265c.

совъ. Реакція якоря, слѣдовательно, на пару полюсовъ для момента, представленнаго на фиг. 265b, будетъ:

$$X_{2\,max} = \frac{z'}{2p} \cdot i_{max}.$$

Такъ какъ токъ въ якорѣ въ моменты предшествующій и послѣдующій, представленные на фиг. 265а и 265с, слабѣе, то мы должны вмѣсто максимальной силы тока ввести среднюю ея величину; тогда получаемъ:

$$X_2 = \frac{z'}{2p} \cdot i_{среднее} = \frac{z'}{2p} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot i_{max}.$$

Если, затѣмъ, вмѣсто i_{max} подставимъ его величину $\sqrt{2} \cdot i$, гдѣ i дѣйствующее значеніе силы тока въ якорѣ, то реакція якоря для пары полюсовъ будетъ:

$$X_2 = 0{,}9 \cdot \frac{i \cdot z'}{2p}.$$

При этомъ мы не учитываемъ того обстоятельства, что путь для магнитнаго потока становится болѣе затруднителенъ, когда полюсъ не приходится непосредственно противъ выступающей части катушки. Каппъ, учитывая точно всѣ явленія, получаетъ вмѣсто коэффиціента 0,9 коэффиціентъ, равный 0,736 для ширины полюса въ 2/3 полюснаго дѣленія, и коэффиціентъ 0,8 для ширины полюса въ 1/2 полюснаго дѣленія. Но для насъ важно только найти такіе коэффиціенты, при помощи которыхъ реакція якоря опредѣлялась бы столь же точно, что и путемъ точнаго математическаго вычисленія. Вообще это опредѣленіе у однофазныхъ машинъ является сравнительно неточнымъ, такъ какъ поле, создаваемое якоремъ, несмотря на самоиндукцію катушекъ электромагнитовъ и токи Фуко въ желѣзѣ полюсовъ, все же въ теченіе одного періода колеблется не мало.

Значительно вѣрнѣе этотъ расчетъ при машинахъ трехфазнаго тока, у которыхъ на якорѣ располагаются три отдѣльныя обмотки. Хотя законы трехфазнаго тока будутъ разсмотрѣны нами нѣсколько дальше, но мы уже здѣсь воспользуемся тѣмъ свойствомъ его, что токъ въ какой-нибудь катушкѣ достигаетъ своей наибольшей силы тогда, когда въ двухъ сосѣднихъ катушкахъ, лежащихъ справа и слѣва, онъ составляетъ половинныя силы. Слѣдовательно, при сдвигѣ фазъ въ 90° находящійся въ нейтральномъ поясѣ проводникъ проводитъ токъ максимальной силы въ то время, какъ проводники по обѣимъ его сторонамъ—токъ того же направленія, но половинной силы (фиг. 266).

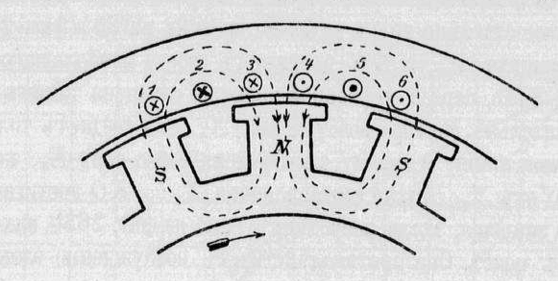
Для опредѣленія реакціи якоря, приходящейся на одну пару полюсовъ, разсмотримъ сначала каналы 2 и 5, въ которыхъ токъ достигаетъ своего наибольшаго значенія. Если число проволокъ на фазу будетъ z', то число

[1]) Kapp, «Dynamomashinen». 4 Aufl., стр. 423 и сл.

проволокъ на индуктирующуюся сторону катушки равно $\frac{z'}{2p}$. Число ампервитковъ катушки 2—5 тогда будетъ $\frac{z'}{2p} \cdot i_{max}$, и катушекъ 3—6 и 1—4 у каждой $\frac{1}{2} \cdot \frac{z'}{2p} \cdot i_{max}$. Противодѣйствующія силовыя линіи между каналами 3 и 4 будутъ создаваться полнымъ противовозбужденіемъ, одна сторона катушки котораго будетъ проходить черезъ каналы 1, 2, 3, а другая черезъ каналы 4, 5 и 6. Противодѣйствующія силовыя линія между каналами 3 и 4 соотвѣтствуютъ числу ампервитковъ:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{z'}{2p} \cdot i_{max} + \frac{z'}{2p} \cdot i_{max} + \frac{1}{2} \cdot \frac{z'}{2p} \cdot i_{max} = \frac{2 \cdot z'}{2p} \cdot i_{max}.$$

Наоборотъ, противодѣйствующія силовыя линіи, расположенныя слѣва отъ канала 3 и справа отъ канала 4, создаются только катушкою 2 — 5



Фиг. 266.

и соотвѣтствуютъ числу ампервитковъ $\frac{z'}{2p} \cdot i_{max}$. При ширинѣ полюса только въ 2/3 полюснаго дѣленія разсматриваемыя теперь силовыя линіи проходятъ черезъ воздушное пространство той же ширины, что и разсмотрѣнныя выше. Поэтому будетъ близко къ истинѣ считать за среднюю реакцію якоря среднее ариѳметическое изъ обѣихъ вышеопредѣленныхъ величинъ. Отсюда имѣемъ:

$$X_2 = 1{,}5 \cdot \frac{z'}{2p} \cdot i_{max} \quad \dots\dots\dots \quad (61).$$

Конечно, это представляетъ собою величину реакціи якоря только въ изображенный моментъ. При дальнѣйшемъ перемѣщеніи электромагнитовъ токъ одной фазы усилится, а другой ослабнетъ, такъ что магнитное дѣйствіе, приблизительно, останется безъ измѣненія. Да при томъ въ нейтраль-

ный поясъ скоро проходитъ другая проволока, по которой пойдетъ теперь максимальный токъ, такъ что вскорѣ вновь наступаетъ изображенное положеніе. При этомъ еще разъ необходимо указать на то, что всѣ наши разсужденія имѣютъ своею цѣлью уяснить только общее дѣйствіе реакціи якоря, не гоняясь при этомъ за строгою математическою точностью. Вполнѣ точное теоретическое опредѣленіе реакціи якоря совершенно даже невозможно. Практическія измѣренія даютъ X_2 на 25% больше полученнаго выше.

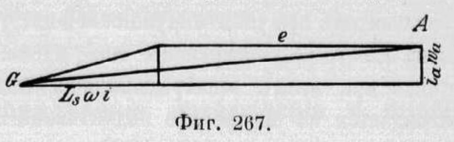
Дѣйствіе реакціи якоря, какъ это указывалось выше, главнымъ образомъ объясняется тѣмъ, что катушка якоря въ характерные моменты, когда токъ принимаетъ наибольшее значеніе, становится въ болѣе или менѣе параллельное положеніе по отношенію къ обмоткѣ электромагнитовъ. На діаграммѣ это выражается тѣмъ, что ампервитки якоря и электромагнитовъ вычитаются при углѣ между ними $90 - \varphi_1$.

Вмѣсто этого можно ампервитки якоря X_2 разложить на составляющія, смѣщенныя относительно другъ друга по времени на 90° (фиг. 263). Одна изъ составляющихъ $X_q = GK$ достигаетъ своего наибольшаго значенія, какъ на фиг. 264b, передъ серединой полюса и смѣщена такимъ образомъ, на 90° относительно вектора возбужденія X_1. Она создаетъ только поперечныя силовыя линія, и потому электродвижущую силу E_q, которая отстаетъ на 90° отъ X_q. Другая составляющая $X_g = KO$ достигаетъ своего наибольшаго значенія, когда проводникъ, какъ на фиг. 265b, находится въ нейтральномъ поясѣ. Она противодѣйствуетъ возбужденію электромагнитовъ, имѣетъ, слѣдовательно, относительно ея сдвигъ фазъ въ 180° и создаетъ электродвижущую силу E_g, которая отстаетъ отъ X_g на 90°.

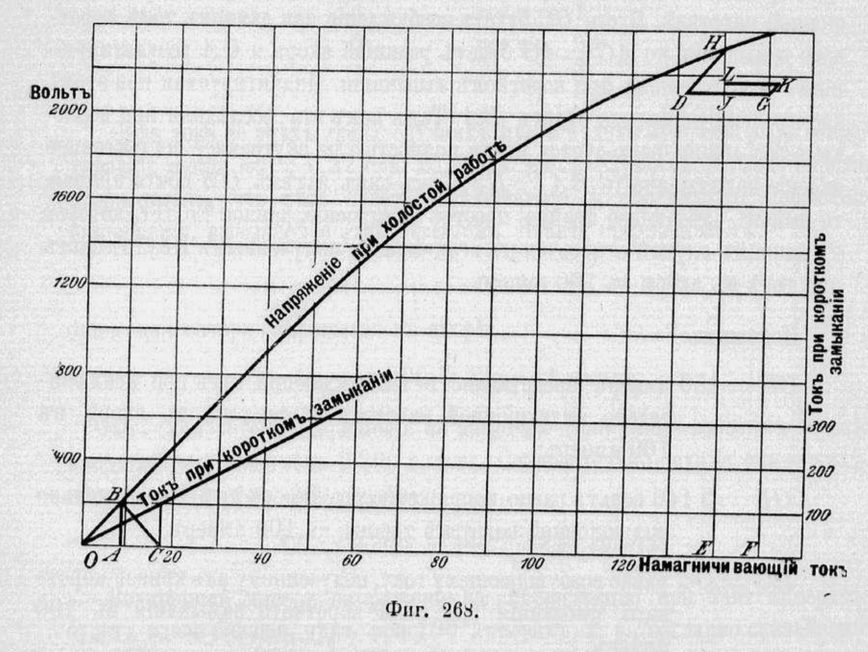
Если магнитныя сопротивленія для поперечнаго потока и главнаго магнитнаго потока одинаковы, то равнодѣйствущей изъ E_g и E_q будетъ электродвижущая сила GO на фиг. 257a. Въ этомъ случаѣ все разложеніе на составляющія является излишнимъ. Если же магнитныя сопротивленія не равновелики, то получаемъ равнодѣйствующую, которая не является чисто индуктивною. Такъ какъ въ виду этихъ явленій предположеніе, что токъ синусоидаленъ, является слишкомъ произвольнымъ, то можетъ быть слѣдовало бы отказаться отъ разложенія на составляющія. Вообще же, строго говоря, разложеніе допустимо только для многофазныхъ обмотокъ, такъ какъ при однофазной обмоткѣ магнитное сопротивленіе для силовыхъ потоковъ, создаваемыхъ каждою изъ этихъ составляющихъ, измѣняется постоянно въ теченіе одного періода.

95. Опытное опредѣленіе реакціи и разсѣянія якоря.

Опредѣленіе реакціи и разсѣянія якоря какой-либо изготовленной машины производятъ на основаніи кривой холостого хода и кривой короткаго замыканія въ связи съ испытаніемъ при исключительно индукціонной нагрузкѣ. Снятіе характеристики холостого хода производится подобнымъ же образомъ, какъ и при машинѣ постояннаго тока; снятіе кривой короткого замыканія производятъ, замыкая машину на короткое черезъ амперметръ и мѣняя ея возбужденіе. Возбуждающій токъ наносятъ тогда по оси абсциссъ, а напряженіе при холостомъ ходѣ или токъ при короткомъ замыканіи по оси ординатъ (фиг. 268). Вычерченныя кривыя взяты изъ одной работы Heyland'a (ETZ. 1900, S. 1011).



Фиг. 267.



Фиг. 268.

Машина нагружается реакціонными катушками или работающими вхолостую двигателями трехфазнаго тока, т. е. имѣетъ чисто индуктивную нагрузку. Такъ какъ при чисто индукціонной нагрузкѣ (фиг. 267)

напряженіе у зажимовъ равно внѣшнему индуктивному паденію напряженія, то оно складывается алгебраически съ внутреннимъ индуктивнымъ паденіемъ напряженія $L_s \cdot \omega \cdot i$, которое вызывается разсѣяніемъ якоря. Сумма $e + L_s \cdot \omega \cdot i$ почти равна электродвижущей силѣ GA. Такъ какъ сдвигъ фазъ составляетъ теперь почти 90°, то эта электродвижущая сила возникаетъ при взаимномъ противодѣйствіи якоря и возбужденія электромагнитовъ. Если, такимъ образомъ, на фиг. 268 возбужденіе электромагнитовъ при чисто индукціонной нагрузкѣ равно OF, а реакція якоря равна EF, то результирующее возбужденіе будетъ равно OE, а индуктируемая при этомъ электродвижущая сила равна EH. Эта послѣдняя распадается на внутреннее индуктивное паденіе напряженія HJ и напряженіе у зажимовъ $JE = GF$.

При короткомъ замыканіи сдвигъ фазъ также составляетъ почти 90°, т. е. токъ въ якорѣ и возбуждающій токъ также противодѣйствуютъ другъ другу. Для одной и той же силы тока самоиндукція и реакція якоря при короткомъ замыканіи будетъ такихъ же размѣровъ, что и при индукціонной нагрузкѣ. Пусть OC будетъ возбужденіе при данномъ токѣ короткаго замыканія, то $AC = JG$ будетъ реакціей якоря и OA результирующимъ возбужденіемъ при короткомъ замыканіи. Индуктируемая при этомъ электродвижущая сила будетъ BA. Такъ какъ эта послѣдняя при короткомъ замыканіи расходуется почти полностью на внутреннее индуктивное паденіе напряженія, то $BA = HJ$. Такъ какъ, затѣмъ, OB почти прямая, то имѣемъ слѣдующее крайне простое построеніе, данное Potier, которое въ данномъ случаѣ относится къ величинамъ, полученнымъ Heyland'омъ при токѣ въ якорѣ въ 100 амперъ.

Положимъ:

$OF = 150$ амперъ представляетъ возбуждающій токъ при исключительно индукціонной нагрузкѣ и при токѣ въ якорѣ въ 100 амперъ;

$GF = 2\,140$ вольтъ равно напряженію у зажимовъ при исключительно индукціонной нагрузкѣ токомъ въ 100 амперъ;

$DG = OC$ равно возбуждающему току, полученному изъ кривой короткаго замыканія при токѣ короткаго замыканія въ 100 амперъ;

DH параллельная начальной прямолинейной части кривой холостого хода.

Тогда электродвижущая сила, т. е. сумма изъ напряженія у зажимовъ и индуктивнаго паденія напряженія, будетъ равна

$HE = 2\,320$ вольтъ. Согласно этому индуктивное паденіе напряженія при 100 амперахъ будетъ:

$$L_s \cdot \omega \cdot i = HJ = 2\,320 - 2\,140 = 180 \text{ вольтъ}$$

и реакція якоря

$$X_2 = OF - JG = 10 \text{ амперъ.}$$

96. Предварительное опредѣленіе возбужденія и паденія напряженія.

Поставивъ теперь себѣ задачей опредѣлить необходимое возбужденіе у указанной въ предыдущей статьѣ машины для напряженія у зажимовъ въ 2 200 вольтъ, при

1. . . . $\cos\varphi = 1$
2. . . . $\cos\varphi = 0,8$
3. . . . $\cos\varphi = 0.$

Сила тока во всѣхъ трехъ случаяхъ пусть будетъ 200 амперъ, а сопротивленіе якоря $w_a = 0,22$ ома. Во всѣхъ трехъ случаяхъ, затѣмъ, будемъ предполагать, что сѣть будетъ выключаться, и опредѣлимъ повышеніе напряженія, вызываемое этимъ фактомъ. Итакъ, предполагаемъ:

1. . . . $\cos\varphi = 1;$

омическая потеря напряженія въ якорѣ:

$$i \cdot w_a = 200 \cdot 0,22 = 44 \text{ вольта.}$$

Омическая потеря напряженія во внѣшней цѣпи равна въ этомъ случаѣ напряженію у зажимовъ 2 200 вольтъ. Слѣдовательно, сумма омическихъ напряженій на фиг. 269а равна:

$$AB = 2\,200 + 44 = 2\,244 \text{ вольта.}$$

Внутренняя потеря напряженія на самоиндукцію при 200 амперахъ будетъ вдвое больше, чѣмъ при 100 амперахъ, т. е., согласно сказанному въ концѣ предыдущей статьи, равна 360 вольтъ

$$GA = 360 \text{ вольтъ.}$$

Слѣдовательно, необходимая электродвижущая сила будетъ:

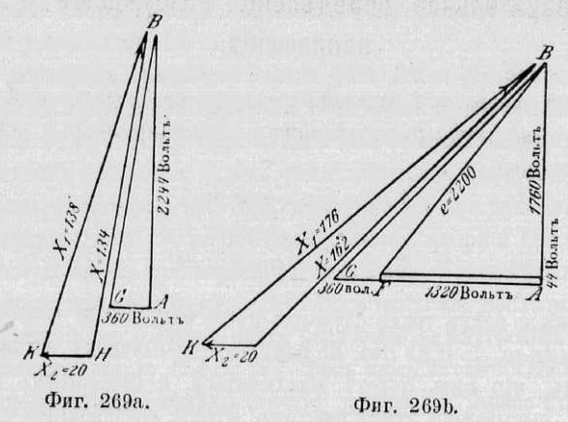
$$GB = \sqrt{2\,244^2 + 360^2} = 2\,275.$$

Этой послѣдней изъ статической характеристики на фиг. 268 соотвѣтствуетъ равнодѣйствующее возбужденіе:

$$X = BH = 134 \text{ ампера.}$$

Съ другой стороны, согласно сказанному въ концѣ предыдущей статьи, для тока въ якорѣ въ 200 амперъ получаемъ реакцію якоря:

$$X_2 = 20 \text{ амперамъ.}$$



Фиг. 269a. Фиг. 269b.

Путемъ геометрическаго сложенія ампервитковъ X и X_2 на фиг. 269a получаемъ:

$$X_1 = 138 \text{ амперъ.}$$

Этимъ мы опредѣляемъ необходимое возбужденіе электромагнитовъ при безъиндукціонной нагрузкѣ и можемъ, теперь, опредѣлить повышеніе напряженія, которое наступитъ послѣ выключенія сѣти. Для 138 амперъ возбужденія статическая характеристика даетъ напряженіе при холостомъ ходѣ въ 2 300 вольтъ. Такъ какъ напряженіе у зажимовъ во время работы было въ 2 200 вольтъ, то повышеніе напряженія будетъ въ 2 300 — 2 200 = 100 вольтъ. Послѣднее составляетъ 4,55% напряженія у зажимовъ, т. е. очень благопріятную величину.

Предположимъ, теперь:

$$2. \quad . \quad . \quad . \quad \cos\varphi = 0{,}8.$$

Мы получимъ, подобно стр. 329.

$$i \cdot w_a = 200 \cdot 0{,}22 \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; = \quad 44,$$

$$i \cdot w_{внѣшнее} = e \cdot \cos\varphi = 2\,200 \cdot 0{,}8 \; . \; . \; = 1\,760,$$

$$L \cdot \omega \cdot i_{внѣшнее} = e \cdot \cos\varphi = 2\,200 \cdot 0{,}6 \; . \; = 1\,320,$$

$$E_{s\ внутреннее}, \text{ какъ выше} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; = \quad 360.$$

Сумма омическихъ напряженій составляетъ, слѣдовательно, 1804 вольта и сумма потерь напряженія на самоиндукцію 1 680 вольтъ. Слѣдовательно, необходимая электродвижущая сила GB (фиг. 269b) будетъ:

$$GB = \sqrt{1\,804^2 + 1\,680^2} = 2\,460 \text{ вольтъ.}$$

Къ тому же изъ характеристики фиг. 268, если мы, какъ и дальше, будемъ интерполировать, получаемъ равнодѣйствующее возбужденіе:

$$X = 162 \text{ ампера.}$$

Къ послѣднему мы геометрически прибавляемъ реакцію якоря $X_2 = 20$ амперъ и получаемъ возбужденіе электромагнитовъ:

$$X_1 = KB = 176 \text{ амперъ.}$$

Слѣдовательно, для того, чтобы при сдвигѣ фазъ поддерживать напряженіе у зажимовъ въ 2 200 вольтъ, мы должны усилить возбужденіе на 176 амперъ. Если же мы, теперь, выключимъ сѣть, то, понятно, напряженіе при холостомъ ходѣ возрастетъ, и изъ характеристики при холостомъ ходѣ для 176 амперъ возбужденія получимъ напряженіе въ 2 530 вольтъ. Повышеніе напряженія, слѣдовательно, будетъ 2 530 — 2 200 = = 330 вольтъ или 15% напряженія у зажимовъ.

Наконецъ, предполагаемъ:

$$3 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \cos\varphi = 0.$$

При чисто индукціонной нагрузкѣ самоиндукція во внѣшней цѣпи равна напряженію у зажимовъ 2 200 вольтъ, и сумма потерь напряженій на самоиндукцію составляетъ тогда 2 200 + 360 = 2 560 вольтъ. Такъ какъ омическая потеря напряженія, составляющая всего 44 вольта, играетъ несущественную роль, то электродвижущую силу можно считать равною 2 560 вольтъ. Для этой послѣдней характеристика при холостомъ ходѣ даетъ равнодѣйствующее возбужденіе:

$$X = 180 \text{ амперъ.}$$

Къ этому прибавляется почти алгебраически реакція якоря, равная 20 амперамъ, и мы получимъ возбужденіе электромагнитовъ:

$$X_1 = 180 + 20 = 200 \text{ амперъ.}$$

Теперь, опять выключаемъ наружную сѣть; тогда напряженіе, согласно характеристикѣ при холостомъ ходѣ, возрастаетъ до 2 630 вольтъ, т. е. на 2 630 — 2 200 = 430 вольтъ. Это составляетъ 19,5% напряженія у зажимовъ, что слѣдуетъ считать сравнительно благопріятнымъ результатомъ. Но необходимо указать на то, что всѣ вычисленія данной главы возможны только для такихъ машинъ, у которыхъ разсѣяніе электромагнитовъ очень незначительно. У указанной нами выше машины это имѣетъ мѣсто, ибо разстоянія между полюсными наконечниками, а также и между боковыми поверхностями самихъ стержней электромагнитовъ очень значительны. Кромѣ того, длина самого электромагнита весьма мала, и разсѣяніе, поэтому, сравнительно невелико. Для машинъ съ большимъ первичнымъ разсѣяніемъ необходимо ввести еще нѣкоторую поправку, о которой будетъ сказано въ слѣдующей главѣ.

97. Вліяніе первичнаго разсѣянія.

Съ перваго взгляда можетъ показаться, что вліяніе первичнаго разсѣянія учитывается уже въ характеристикѣ холостого хода. Но если построить машину для опредѣленной нагрузки и затѣмъ построить ея діаграмму, то окажется, что состояніе работы, опредѣляемое путемъ расчета, не будетъ соотвѣтствовать той величинѣ, которая будетъ взята изъ діаграммы.

Наше предположеніе, что результирующее возбужденіе и равновеликое возбужденіе при холостомъ ходѣ создаютъ одинаковую электродвижущую силу, строго говоря, не совсѣмъ правильно. Для поясненія этого разсмотримъ два состоянія: при холостомъ ходѣ и при работѣ, при которыхъ будутъ индуктироваться одинаковыя электродвижущія силы, и, слѣдовательно, въ якорѣ будетъ существовать одинаковое число силовыхъ линій. Для прохожденія этихъ силовыхъ линій черезъ воздухъ, зубцы и якорь необходимо давленіе $X_a + X_z + X_l$. Это давленіе имѣется на полюсныхъ наконечникахъ и оно же гонитъ силовой потокъ утечки сквозь сопротивленіе первичнаго поля разсѣянія.

Если черезъ X_g обозначимъ составляющую реакціи якоря, по своему дѣйствію противоположную возбужденію электромагнитовъ, то на полюсныхъ наконечникахъ должно существовать магнитное давленіе $X_a + X_z + X_l + X_g$, чтобы прогнать сквозь якорь тотъ же магнитный потокъ, что и выше при холостомъ ходѣ. Такъ какъ это давленіе дѣйствуетъ и на поле разсѣянія, то потокъ утечки возрастаетъ на величину, соотвѣтствующую возбужденію X_g. Отсюда индукція и индуктивный расходъ напряженія X_m въ электромагнитахъ при работѣ больше, чѣмъ при холостомъ ходѣ. Слѣдовательно, возбужденіе электромагнитовъ при работѣ необходимо увеличивать не только на величину X_g, но еще на величину, на которую возросъ полный расходъ магнитнаго давленія X_m. Такимъ образомъ, изъ этого мы видимъ, что число ампервитковъ, которое мы беремъ изъ характеристики холостого хода, мало для возбужденія опредѣленной электродвижущей силы.

Мы можемъ сказать, наоборотъ, что при заданномъ возбужденіи электромагнитовъ первичное разсѣяніе совмѣстно съ реакціей якоря вызываетъ увеличеніе паденія напряженія.

Одновременно изъ того же разсужденія мы видимъ, что увеличеніе первичнаго разсѣянія у машинъ, у которыхъ расходъ магнитнаго давленія X_m вообще незначителенъ и у которыхъ, слѣдовательно, стержни электромагнитовъ слабо насыщены, не имѣетъ существеннаго значенія. У машинъ новѣйшихъ типовъ насыщеніе стержней электромагнитовъ устраивается очень сильнымъ, чтобы при измѣненіяхъ нагрузки напряженіе колебалось въ очень незначительныхъ предѣлахъ. У этихъ машинъ увеличеніе первичнаго разсѣянія благодаря реакціи якоря уже играетъ существенную роль, и потому по возможности уменьшаютъ первичное разсѣяніе.

Для болѣе точнаго опредѣленія вліянія разсѣянія, разсмотримъ какое-нибудь состояніе холостого хода машины, при которомъ силовой потокъ въ электромагнитахъ будетъ одинаковъ съ силовымъ потокомъ при работѣ. Кромѣ того, предположимъ, что весь потокъ утечки распредѣляется на концахъ полюсовъ и что магнитное сопротивленіе якоря безъ большой погрѣшности можетъ быть прибавлено къ сопротивленію воздуха.

Пусть на фиг. 270:

OC потокъ въ междужелѣзномъ пространствѣ при разсматриваемомъ состояніи холостого хода.

OB потокъ въ междужелѣзномъ пространствѣ при работѣ.

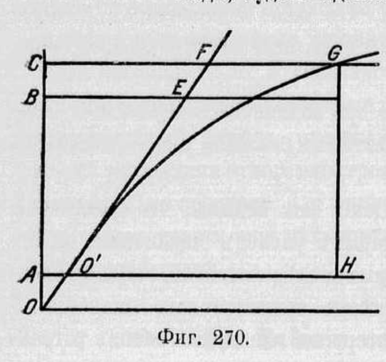
$OA = BC$ увеличеніе разсѣянія при работѣ по сравненію съ холостымъ ходомъ.

Тогда, согласно стр. 224.

CF магнитодвижущая сила для преодолѣнія сопротивленія междужелѣзнаго пространства при холостомъ ходѣ.

BE магнитодвижущая сила для преодолѣнія сопротивленія междужелѣзнаго пространства при работѣ.

FG магнитодвижущая сила для преодолѣнія сопротивленія пути въ электромагнитахъ, которое при предположеніи одинаковаго магнитнаго потока какъ при работѣ, такъ и при холостомъ ходѣ, будетъ одинаково.



Фиг. 270.

Прямая, проведенная черезъ точку A параллельно оси абсциссъ, пересѣкаетъ въ началѣ прямолинейную часть кривой намагничиванія въ точкѣ O'. Тогда легко видѣть, такъ какъ $OA = BC$, что возбужденіе электромагнитовъ, которое необходимо при работѣ для прохожденія потокомъ воздушнаго слоя и стержней электромагнитовъ, будетъ равно:

$$BE + FG = O'H$$

и магнитный потокъ въ воздушномъ слоѣ при работѣ:

$$BO = GH.$$

Такимъ образомъ, точка O' является начальною точкой новой координатной системы, у которой абсцисса $O'H$ будетъ равнодѣйствующимъ возбужденіемъ, т. е. представляетъ собою величину $X_1 - X_g$, а ордината GH силовой потокъ въ якорѣ или электродвижущую силу.

Магнитодвижущая сила по пути разсѣянія при холостомъ ходѣ равна CF, а при работѣ равна $BE + X_g$. Если $\boldsymbol{W}_s$ будетъ сопротивленіе поля разсѣянія, то увеличеніе разсѣянія будетъ:

$$OA = \frac{BE + X_g - CF}{\boldsymbol{W}_s} = \frac{X_g - AO'}{\boldsymbol{W}_s}.$$

Такъ какъ, съ другой стороны, прямая OF является кривой намагничиванія для воздушнаго слоя, то, если черезъ $\boldsymbol{W}$ обозначимъ сопротивленіе воздушнаго слоя, тогда

$$OA = \frac{AO'}{\boldsymbol{W}}.$$

Приравняемъ, теперь, другъ другу значенія OA, опредѣлимъ изъ нихъ OA' и подставимъ $\boldsymbol{W}/\boldsymbol{W}_s = \tau_1$. Тогда будемъ имѣть:

$$AO' = \frac{\tau_1}{1 + \tau_1} \cdot X_g.$$

Точка O' характеристики сдвинута, такимъ образомъ, вправо относительно точки O на постоянную величину AO'.

Теперь изъ фигуры ясно, что у машинъ, которыя работаютъ въ прямолинейной части характеристики, первичное разсѣяніе не оказываетъ никакого вліянія. Перемѣщеніе начальной точки изъ O въ O' совершенно не измѣняетъ характеристики.

Строго говоря, вліяніе первичнаго разсѣянія можно разсмотрѣть уже на фиг. 268. При перенесеніи начальной точки координатной системы точка C перемѣщается вдоль по прямолинейной части характеристики въ точку K, т. е., такъ какъ въ примѣрѣ статьи 95 сдвигъ фазъ составляетъ 90° и $X_g = X_2$, эта точка перемѣщается на еще неизвѣстную составляющую $X_2 \cdot \frac{\tau_1}{1+\tau_1}$ вправо. Если же, затѣмъ, изъ K сдѣлаемъ то же построеніе, что и раньше дѣлали изъ точки G, то мы придемъ, что легко видѣть, въ ту же точку H, какъ и раньше. Принимая затѣмъ во вниманіе первичное разсѣяніе, получаемъ HL—расходъ напряженія на внутреннюю самоиндукцію и LK—реакцію якоря X_2. Можно доказать, что LK равно $(1 + \tau_1) . JG$, и отсюда получаемъ точку K.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ.

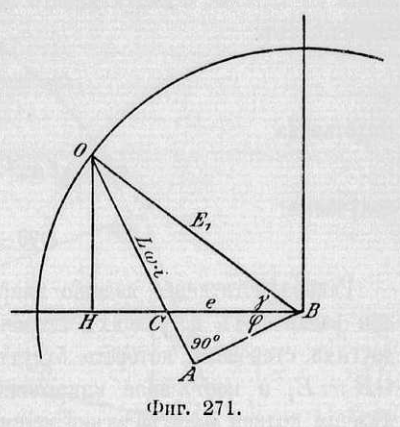
98. Машины перемѣннаго тока съ постояннымъ возбужденіемъ и постояннымъ напряженіемъ у зажимовъ.

Разсмотримъ, теперь, машину съ постояннымъ возбужденіемъ, включенную параллельно съ нѣсколькими другими машинами. Тогда напряженіе у зажимовъ не будетъ уже больше функціей одной только данной машины, а будетъ функціей и другихъ параллельно включенныхъ машинъ. Если эти послѣднія очень велики, то измѣненія въ нашей машинѣ совершенно не будутъ вліять на напряженія у зажимовъ e, и потому практически можемъ считать это послѣднее за постоянное.

Далѣе, ради упрощенія, будемъ реакцію якоря разсматривать совмѣстно съ индукціей потока утечки въ якорѣ, такъ что основная діаграмма фиг. 252 сохранитъ и въ этомъ случаѣ свою силу. На этой діаграммѣ векторъ E_1 будетъ тогда представлять индуктируемую одинаково какъ при работѣ, такъ и при холостомъ ходѣ электродвижущую силу, которая вслѣдствіе постояннаго возбужденія при всѣхъ состояніяхъ работы должна разсматриваться, какъ постоянная.

Ради упрощенія разсмотримъ сначала машину, сопротивленіе якоря которой очень незначительно. Тогда векторъ CF на фиг. 252 будетъ равенъ

нулю, и получимъ треугольникъ напряженія, сторонами котораго будутъ: электродвижущая сила $E_1 = OB$, индуктивное паденіе напряженія $L \cdot \omega \cdot i = OC$ и напряженіе у зажимовъ CB. Индуктивная потеря напряженія заключаетъ въ себѣ, согласно статьѣ 92, и реакцію якоря. При этомъ векторъ электродвижущей силы опережаетъ векторъ напряженія у зажимовъ на уголъ γ. Въ зависимости отъ размѣровъ угла γ будетъ измѣняться и мощность разсматриваемой нами машины. Оставимъ пока открытымъ вопросъ, какимъ образомъ достигается это измѣненіе мощности, теперь же поставимъ себѣ задачей выразить эту мощность въ видѣ функціи угла γ. Для этой цѣли заставимъ векторъ CB постояннаго напряженія у зажимовъ на фиг. 271 все время совпадать съ осью абсциссъ, при всѣхъ рабочихъ состояніяхъ машины. Такъ какъ электродвижущая сила $E_1 = OB$ постоянна, то точка O постоянно находится на окружности, описанной около точки B радіусомъ E_1.



Фиг. 271.

При различныхъ рабочихъ состояніяхъ перемѣщается по окружности только точка O, въ то время какъ точки C и B остаются неподвижными. Векторъ OC постоянно представляетъ собою индуктивное паденіе напряженія $L \cdot \omega \cdot i$. Векторъ AB перпендикулярный къ OC, подобно фиг. 252, является внѣшнимъ омическимъ паденіемъ напряженія, т. е. уголъ φ будетъ угломъ сдвига фазъ между напряженіемъ у зажимовъ и силою тока. Если изъ точки O опустимъ перпендикуляръ на ось абсциссъ, то уголъ COH будетъ равенъ углу φ. Тогда, въ виду того, что сопротивленіе статора равно нулю, сообщаемая генератору механическая мощность P_1 будетъ равна отдаваемой электрической мощности, слѣдовательно:

$$P_1 = e \cdot i \cdot \cos\varphi = e \cdot \frac{OC}{L\omega} \cdot \cos COH.$$

$OC \cdot \cos COH$ будетъ проэкціей OC на ось ординатъ. Эта проэкція OH, умноженная на $\frac{e}{L\omega}$, даетъ мощность, воспринимаемую и отдаваемую генераторомъ. Легко видѣть, что мощность съ увеличеніемъ угла γ возрастаетъ, пока наконецъ γ не станетъ $= 90^\circ$ и точка O вслѣд-

ствіе этого не совпадаетъ съ осью ординатъ. Въ этомъ случаѣ машина воспринимаетъ наибольшую механическую мощность, какую она только въ состояніи вообще превратить въ электрическую энергію.

Положимъ, теперь, согласно фиг. 271, $OC \cdot cos\,COH = E_1 \cdot sin\gamma$, и вмѣсто $\frac{E_1}{L\omega}$ подставимъ токъ при короткомъ замыканіи J_0, тогда

$$P_1 = e \cdot J_0 \cdot sin\gamma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (62).$$

Принимая во вниманіе внутреннее омическое сопротивленіе, мы получимъ тѣ же соотношенія. Согласно фиг. 252, полное внутреннее паденіе напряженія OF будетъ равнодѣйствующей изъ омическаго паденія напряженія $CF = i \cdot w_a$ и индуктивнаго паденія напряженія $CO = L \cdot \omega \cdot i$. Отсюда имѣемъ:

$$tg\varkappa = \frac{w_a}{L \cdot \omega}.$$

Подставляя

$$z = \sqrt{w_a^2 + (L \cdot \omega)^2},$$

получаемъ:

$$OF = i \cdot z.$$

Равнодѣйствующее паденіе напряженія OF является измѣняющейся при различныхъ нагрузкахъ стороной треугольника напряженій, двумя другими сторонами котораго будутъ постоянная электродвижущая сила $OB = E_1$ и постоянное напряженіе у зажимовъ $FB = e$. Для опредѣленія полной электрической мощности P, проведемъ — ради удобства — векторъ электродвижущей силы $OB = E_1$ для всѣхъ рабочихъ состояній такимъ образомъ, чтобы онъ съ осью абсциссъ образовалъ вышеуказанный уголъ α (фиг. 272). Векторъ напряженія у зажимовъ $FB = e$ отстаетъ отъ электродвижущей силы на уголъ γ. Величина угла γ при различныхъ рабочихъ состояніяхъ, т. е. при различныхъ нагрузкахъ, будетъ различна. Конечная точка F перемѣщается при различныхъ нагрузкахъ по окружности, описанной около центра B радіусомъ $BF = e$.

Полная электрическая мощность, согласно фиг. 272, будетъ:

$$P_1 = E_1 \cdot i \cdot cos(\gamma + \varphi).$$

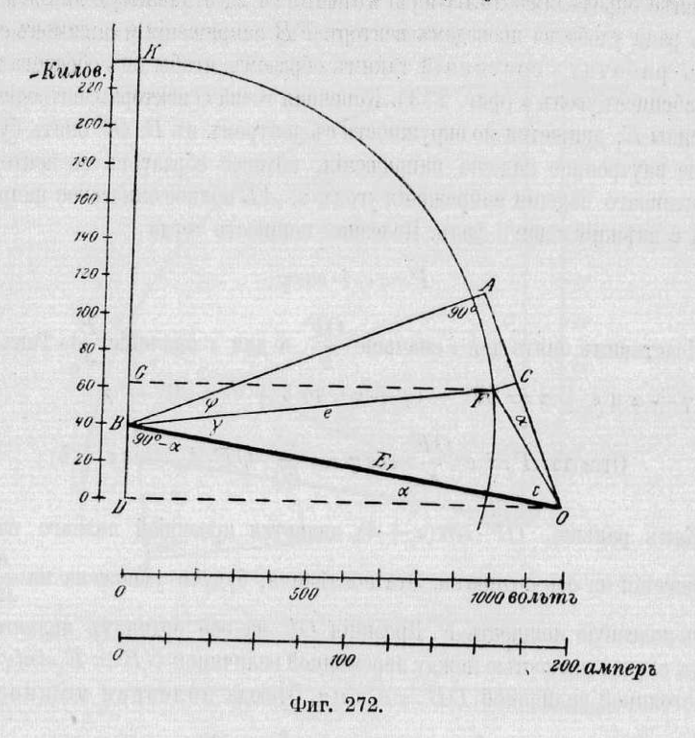
По $\varepsilon + \alpha = 90° - (\gamma + \varphi)$. Тогда механическая сообщаемая мощность въ связи съ вышеуказаннымъ уравненіемъ для OF будетъ:

$$P_1 = E_1 \cdot \frac{OF}{z} \cdot sin(\varepsilon + \alpha).$$

При этомъ $\frac{E_1}{z}$ равно току J_0 при короткомъ замыканіи и $OF \cdot sin(\varepsilon + \alpha)$ равно проэкціи вектора OF на ось ординатъ. Слѣдовательно, для полученія полной электрической мощности мы должны эту проэкцію DG умножить на токъ при короткомъ замыканіи J_0.

Далѣе, DG состоитъ изъ постоянной части $DB = E_1 \cdot sin\alpha$ и перемѣнной $BG = e \cdot sin(\gamma - \alpha)$. Тогда полная электрическая мощность будетъ:

$$P_1 = \{e \cdot sin(\gamma - \alpha) + E_1 \cdot sin\alpha\} \cdot J_0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (63).$$



Фиг. 272.

Не трудно видѣть, что проэкція OF на ось ординатъ при неподвижномъ векторѣ E_1 будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше будетъ уголъ γ, т. е. увеличеніе мощности влечетъ за собою возрастаніе угла γ. Для $\gamma = 90 + \alpha$, когда точка F совпадаетъ съ точкою K, мы получимъ наибольшую полную электрическую мощность. Тогда имѣемъ:

$$P_{1\,max} = (e + E_1 sin\alpha) \cdot J_0.$$

Фиг. 272 вычерчена въ предположенiи, что

$$E_1 = 1200, \qquad e = 1000, \qquad w_a = 1, \qquad L\omega = 6.$$

Тогда

$$J_0 = \frac{E}{\sqrt{w^2 + (L\omega)^2}} = 197 .$$

Путемъ соотвѣтствующаго измѣненiя масштаба можно мощность прочитывать непосредственно на оси ординатъ.

Далѣе опредѣлимъ полезную мощность P, отдаваемую въ сѣть. При этомъ ради удобства проведемъ векторъ FB напряженiя у зажимовъ e для всѣхъ рабочихъ состоянiй такимъ образомъ, чтобы онъ образовалъ съ осью абсциссъ уголъ α (фиг. 273). Конечная точка O вектора электродвижущей силы E_1 движется по окружности съ центромъ въ B. OF опять будетъ полное внутреннее паденiе напряженiя, которое образуетъ съ векторомъ индуктивнаго паденiя напряженiя уголъ α. AB полное омическое напряженiе, а φ внѣшнiй сдвигъ фазъ. Полезная мощность тогда

$$P = e \cdot i \cdot \cos\varphi .$$

Подставимъ опять для i значенiе $\frac{OF}{z}$, а для z значенiе $\frac{E_1}{J_0}$. Такъ какъ $\delta = \gamma + \alpha$ и $\varepsilon + \alpha = 90^\circ - (\gamma + \varphi)$, то $\delta + \varepsilon = 90^\circ - \varphi$.

Отсюда $$P = e \cdot \frac{OF}{z} \cdot \cos\varphi = \frac{e}{E_1} \cdot OF \cdot J_0 \cdot \sin(\varepsilon + \delta) .$$

Какъ раньше, $OF \cdot \sin(\varepsilon + \delta)$ является проэкцiей полнаго паденiя напряженiя на ось ординатъ. Эта послѣдняя, будучи умножена на $\frac{e}{E_1} \cdot J_0$, даетъ полезную мощность P. Проэкцiя OF на ось ординатъ является въ этомъ случаѣ разностью между перемѣнной величиной $GB = E_1 \sin(\gamma + \alpha)$ и постоянной величиной $DB = e \cdot \sin\alpha$. Отсюда полезная мощность

$$P = \left\{ e \cdot \sin(\gamma + \alpha) - \frac{e^2}{E_1} \sin\alpha \right\} J_0 . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (64)$$

Наибольшей своей величины она достигаетъ при $\gamma = 90^\circ - \alpha$. Въ этомъ случаѣ точка O совпадаетъ съ точкою L.

Путемъ соотвѣтствующаго измѣненiя масштаба можно снова прочитывать мощность на оси ординатъ. Фиг. 273 вычерчена также для

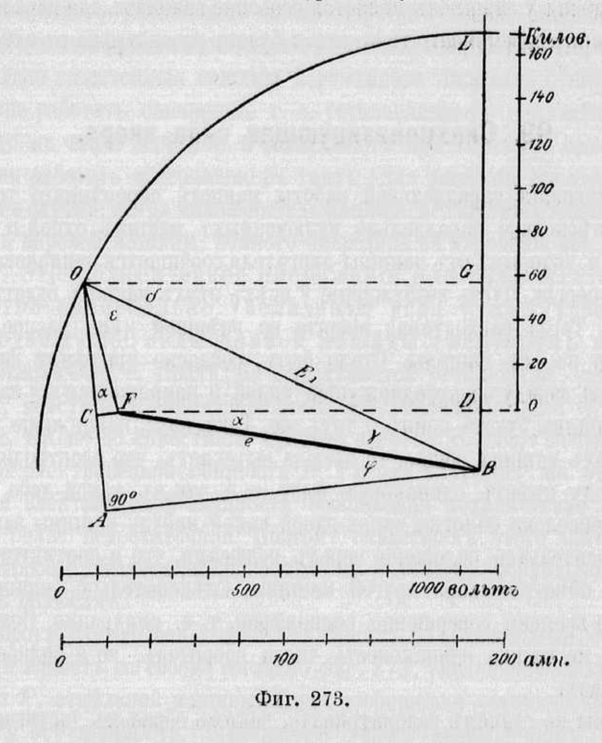
$$E_1 = 1200, \qquad e = 1000, \qquad w_a = 1 \text{ и } L\omega = 6.$$

Отсюда переводный множитель для масштаба будетъ $\frac{e}{E_1} \cdot J_0 = 164$.

На фиг. 272 и 273 можно прочесть просто и силу тока. Пользуясь вышеуказанными численными данными, имѣемъ:

$$i = \frac{OF}{z} = 0{,}164 \cdot OF ,$$

гдѣ OF слѣдуетъ измѣрять въ масштабѣ вольтъ. Путемъ соотвѣтствующаго измѣненiя можно силу тока отчитывать непосредственно въ амперахъ. Измѣненный масштабъ указанъ на фигурѣ внизу.



Фиг. 273.

Фиг. 272 и 273 вычерчены для одного и того же рабочаго состоянiя, т. е. для полной электрической мощности въ 62 киловатта. Изъ фиг. 273, получаемъ полезную мощность въ 58,4 киловатта. Силу тока изъ OF получаемъ въ 60 амперъ, при сопротивленiи якоря въ 1 омъ, потеря на тепло Джоуля будетъ составлять 3,6 киловатта. Эта потеря равна разности между полной мощностью и полезной. Для большей ясности соотношенiя

выбраны такимъ образомъ, что результаты потери получаются больше, чѣмъ это имѣетъ мѣсто на практикѣ.

Изъ фиг. 272 и 273 вытекаетъ, что опредѣленному сдвигу фазъ между электродвижущей силой и напряженіемъ у зажимовъ соотвѣтствуетъ опредѣленная полная мощность, полезная мощность и сила тока. Нормально машина работаетъ при наибольшемъ сдвигѣ фазъ между электродвижущей силой и напряженіемъ у зажимовъ, для того, чтобы потеря на тепло Джоуля была незначительна и кромѣ того была возможна значительная перегрузка.

Увеличеніе мощности съ возрастаніемъ опереженія электродвижущей силою напряженія у зажимовъ является особенно важнымъ для параллельной работы машинъ перемѣннаго тока, что и будетъ разсмотрѣно въ слѣдующей статьѣ.

99. Синхронизирующая сила якоря.

Для выясненія параллельной работы машинъ перемѣннаго тока разсмотримъ нѣсколько параллельно включенныхъ машинъ одной и той же конструкціи, которымъ отъ машины-двигателя сообщается одинаковая механическая энергія. Пусть возбужденіе у всѣхъ этихъ машинъ будетъ также одинаково. Тогда расходуемая энергія во внѣшней цѣпи распредѣлится равномѣрно на всѣ машины. Стало быть, согласно діаграммѣ фиг. 272, сдвигъ фазъ между электродвижущей силой и напряженіемъ у зажимовъ у всѣхъ машинъ будетъ одинъ и тотъ же. Такъ какъ напряженіе у зажимовъ у всѣхъ машинъ общее, то отсюда вытекаетъ, что электродвижущая сила повсюду имѣетъ одинаковую фазу, т. е. что въ какой-либо данный моментъ проволока обмотки якоря одной какой-нибудь машины занимаетъ то же относительное положеніе передъ полюсами, чтó и соотвѣтствующая проволока обмотки якоря другой машины. Слѣдовательно, машины вращаются по времени совершенно равномѣрно, т. е. синхронно. Подъ этимъ разумѣемъ не только одинаковость числа оборотовъ, но и полное совпаденіе по фазѣ.

Пока мы не станемъ разсматривать, какимъ образомъ достигается это согласованіе. Мы лучше прежде зададимся вопросомъ, почему это согласованіе въ числѣ оборотовъ и фазахъ продолжаетъ поддерживаться послѣ того, какъ оно хоть разъ осуществилось. Вся важность этого вопроса очевидна сама по себѣ. При параллельной работѣ, какъ это указываетъ сравненіе съ постояннымъ токомъ, необходимо электродвижущія силы включать такимъ образомъ, чтобы зажимы одного наименованія соединялись

другъ съ другомъ послѣдовательно. Отдѣльныя электродвижущія силы при этомъ будутъ включены навстрѣчу другъ другу. Слѣдовательно, когда машины перемѣннаго тока включены параллельно, то необходимо не только, чтобы въ какой-либо данный моментъ направленіе электродвижущихъ силъ во всѣхъ машинахъ было одинаково, но чтобы направленіе ихъ во всѣхъ машинахъ мѣнялось постоянно одновременно. Это, понятно, предполагаетъ заранѣе, что всѣ машины вращаются съ совершенно одинаковымъ числомъ оборотовъ, или что онѣ, при неодинаковомъ числѣ полюсовъ, работаютъ съ строго одинаковымъ числомъ періодовъ.

Такого строго одинаковаго числа оборотовъ нельзя было бы никоимъ образомъ достичь путемъ какого-либо внѣшняго воздѣйствія. Но, къ счастью, параллельно включенныя машины перемѣннаго тока сами обнаруживаютъ стремленіе работать синхронно, т. е. устанавливаютъ для всѣхъ машинъ одно и то же число періодовъ и заставляютъ при этомъ всѣ свои машины-двигатели работать совершенно въ тактъ. Для уясненія послѣдняго возьмемъ тотъ случай, когда какая-нибудь машина, вслѣдствіе степени неравномѣрности паровой машины, немного опередила на мгновеніе всѣ остальныя машины. Это механическое опереженіе или опереженіе въ пространствѣ равносильно увеличенію угла γ между векторомъ электродвижущей силы данной машины и векторомъ напряженія у зажимовъ e. Послѣдній опредѣляется остальными машинами и остается, собственно, безъ перемѣны. Но увеличеніе угла γ, согласно фиг. 272, только до извѣстнаго предѣла влечетъ за собою возрастаніе создаваемой электрической мощности P_1 [1]). Для полученія же этой увеличившейся электрической мощности сообщаемая механическая мощность является болѣе недостаточной. Поэтому слѣдствіемъ этого явится замедленіе, которое приведетъ якорь обратно въ положеніе, нормальное по отношенію къ полюсамъ.

Наоборотъ, запаздываніе одной изъ машинъ по сравненію съ остальными машинами влечетъ за собою, согласно фиг. 272, уменьшеніе электрической мощности P_1 отдѣльной машины. Тогда сообщаемая механическая энергія превыситъ эту мощность. Вызываемое этимъ превышеніемъ ускореніе приведетъ якорь отставшей машины снова въ надлежащее положеніе, такъ что положеніе послѣдняго будетъ одинаково съ положеніемъ его у другихъ

---

[1]) Такъ какъ на фиг. 272 векторъ E предполагается неподвижнымъ, то мы должны вообразить, что векторъ напряженія у зажимовъ вращается противъ часовой стрѣлки около точки B.

машинъ. Слѣдовательно, диномомашины удерживаютъ паровыя машины и заставляютъ работать ихъ строго математически въ тактъ.

При этомъ мы, конечно, предполагаемъ, что динамомашины работаютъ въ лѣвой части данной на фиг. 272 діаграммы, гдѣ увеличеніе угла γ вызываетъ возрастаніе электрической мощности. Но если машина стала бы работать вблизи ея наибольшей мощности, то при увеличеніи угла γ получается очень небольшое возрастаніе мощности, т. е. незначительная синхронизирующая сила машины. Въ самомъ дѣлѣ, если уже достигнутъ максимумъ мощности, то опереженіе динамо вызоветъ даже уменьшеніе мощности. Слѣдствіемъ этого явится то, что сообщаемая теперь механическая энергія будетъ еще больше превышать отдаваемую электрическую энергію, и машина пріобрѣтетъ еще большее ускореніе. Благодаря этому проволока якоря будетъ постоянно приходить въ ненадлежащее для нея положеніе передъ полюсами, машина выпадетъ изъ синхронизма, и вся система разстроится. Едва ли необходимо при этомъ указывать на то, что между машинами здѣсь пойдутъ чрезвычайно сильные токи. При нормальной работѣ неизбѣжныя опереженія и отставанія якоря машинъ-двигателей будутъ энергично выравниваться синхронизирующимъ дѣйствіемъ якоря. Это необходимо еще тѣмъ болѣе потому, что сравнительно небольшое смѣщеніе въ пространствѣ отражается сильно въ электрическомъ отношеніи.

До сихъ поръ на синхронизирующую силу мы смотрѣли въ сущности, какъ на приращеніе или уменьшеніе электрической мощности, которыя вызываются опереженіемъ или отставаніемъ машинъ. На практикѣ же обыкновенно говорятъ о синхронизирующихъ токахъ, подразумѣвая подъ этимъ, что опередившій генераторъ доставляетъ много тока, а отставшій—мало тока. Напримѣръ, если двѣ машины работаютъ на сѣть, то происходящее при этомъ явленіе мы можемъ представить себѣ такимъ образомъ: синхронизирующій токъ, перетекая съ одной машины на другую, то прикладывается къ току опередившей машины, то вычитается изъ тока отставшей. Первая этимъ токомъ будетъ тогда затормаживаться равномѣрно, а вторая ускоряться, т. е. приводиться въ движеніе въ качествѣ двигателя.

Теперь мы видимъ, что необходимо, чтобы при небольшомъ смѣщеніи увеличеніе мощности было наивозможно большимъ. Только при этомъ условіи синхронизирующая сила будетъ значительна. Слѣдовательно, строго, мы должны ее опредѣлить, какъ отношеніе возрастанія мощности къ увеличенію угла γ, или какъ частное дифференціаловъ $\frac{dP_1}{d\gamma}$. Вообще, создаваемая электрическая мощность, согласно стр. 417, равняется:

$$P_1 = e \cdot J_0 \cdot \sin(\gamma - \alpha) + E_1 \cdot J_0 \cdot \sin \alpha.$$

Откуда

$$\frac{dP_1}{d\gamma} = e \cdot J_0 \cdot \cos(\gamma - \alpha). \quad \ldots \ldots \quad (65)$$

Это уравненіе даетъ намъ возможность опредѣлить вліяніе самоиндукціи на синхронизирующую силу. При этомъ разсмотримъ моментъ послѣ включенія, когда, согласно статьѣ 100, электродвижущая сила и напряженіе у зажимовъ имѣютъ одинаковыя или прямо противоположныя фазы, когда, стало быть, уголъ $\gamma = 0$. На основаніи предыдущей статьи:

$$J_0 = \frac{E_1}{\sqrt{w_a^2 + (L\omega)^2}} = \frac{E_1}{w_a} \cdot \frac{w_a}{\sqrt{w_a^2 + (L\omega)^2}} = \frac{E_1}{w_a} \cdot \sin \alpha.$$

При $\gamma = 0$ синхронизирующая сила будетъ:

$$\frac{dP_1}{d\gamma} = \frac{e \cdot E_1}{w_a} \cdot \sin \alpha \cdot \cos(-\alpha) = E_1 \cdot \frac{e \cdot \sin(2\alpha)}{2 \cdot w_a}.$$

Это выраженіе при заданныхъ E_1, e и w_a будетъ имѣть максимумъ тогда, когда $\alpha = 45°$, когда, слѣдовательно, и индуктивная потеря напряженія будетъ равна омической потерѣ напряженія. Хотя практически это недостижимо, но этотъ расчетъ указываетъ все же на то, что самоиндукція должна быть возможно меньше. Съ другой стороны при $L\omega = 0$, иными словами $\alpha = 90°$, слѣдовательно $\sin 2\alpha = 0$. Такъ какъ тогда и синхронизирующая сила равна нулю, то отсюда слѣдуетъ, что самоиндукція не должна совершенно отсутствовать и что синхроничная работа вообще становится возможною только благодаря ей.

100. Параллельное включеніе машинъ перемѣннаго тока.

Включеніе машины перемѣннаго тока въ сѣть извѣстнаго напряженія въ нѣкоторомъ отношеніи схоже съ подобнымъ же процессомъ при машинѣ постояннаго тока. Положимъ, напримѣръ, въ сѣть, которая питается уже другими машинами, необходимо включить шунтовую машину. Тогда сначала машину пускаютъ въ ходъ при холостой нагрузкѣ, затѣмъ измѣняютъ возбужденіе ея электромагнитовъ до тѣхъ поръ, пока электродвижущая сила

машины не будетъ равновелика напряженію сѣти. Только послѣ этого зажимы машины приключаютъ къ одноименнымъ же зажимамъ сѣти.

Машину перемѣннаго тока пускаютъ въ ходъ также при холостой нагрузкѣ, однако число оборотовъ ея должно, по возможности, строго совпадать съ числомъ періодовъ сѣти. Затѣмъ путемъ измѣненія возбужденія электромагнитовъ приравниваютъ электродвижущую силу присоединяемой машины напряженію у зажимовъ сѣти. Но до включенія необходимо, подобно тому, какъ при машинахъ постояннаго тока, быть вполнѣ убѣжденнымъ, что зажимъ машины, который въ данный моментъ обладаетъ положительнымъ знакомъ, присоединяется къ положительному же въ данный моментъ зажиму сѣти. Только послѣ этого включаютъ машину такъ, чтобы напряженія этой послѣдней и сѣти дѣйствовали другъ другу навстрѣчу.

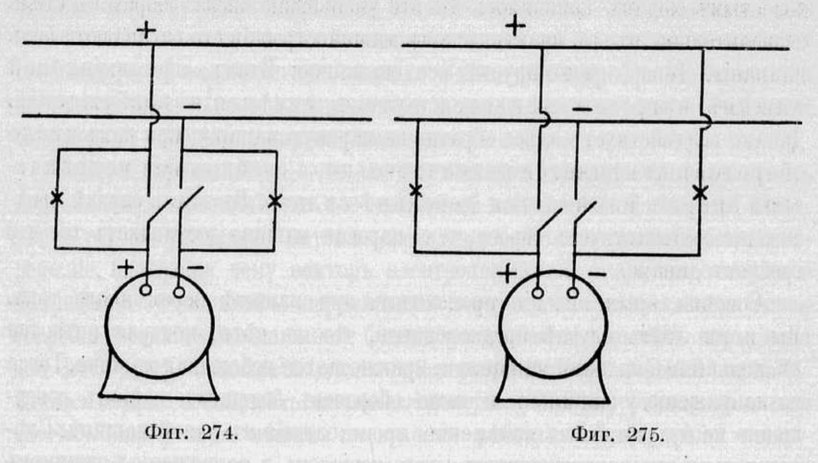
Слѣдовательно, за исключеніемъ только требуемаго при машинахъ перемѣннаго тока совпаденія числа оборотовъ, или числа періодовъ, на что при машинахъ постояннаго тока не обращается никакого вниманія, процессъ параллельнаго включенія машинъ перемѣннаго тока совершенно схожъ съ процессомъ включенія машинъ постояннаго тока. Но при машинѣ перемѣннаго тока труднѣе опредѣлить совпаденіе знаковъ въ моментъ включенія зажимовъ машины со знаками зажимовъ сѣти. Для этого примѣняютъ фазовыя лампы, черезъ которыя при замкнутомъ главномъ выключателѣ машины зажимы этой послѣдней соединяются съ зажимами сѣти (фиг. 274). Приключаемую машину доводятъ, по возможности, до надлежащаго числа оборотовъ, и при схемѣ, изображенной на фиг. 274, въ моментъ, когда лампы тухнутъ, включаютъ выключатель. Теперь можно быть спокойнымъ, что давленіе и противодавленіе въ этотъ моментъ уравновѣшиваютъ другъ друга, какъ это видно и изъ знаковъ у зажимовъ на фиг. 274. Эти знаки у зажимовъ имѣютъ мѣсто, понятно, только для изображеннаго момента.

Но можно примѣнить схему, указанную и на фиг. 275, у которой должный моментъ для включенія опредѣляется тѣмъ, что лампы ярко загораются. Въ моментъ, изображенный на фиг. 275, зажимы машины и сѣти, которые необходимо намъ соединить другъ съ другомъ при посредствѣ выключателя, имѣютъ одинаковые знаки. Слѣдовательно, машина и сѣть черезъ фазовыя лампы включены послѣдовательно, и лампы ярко загораются.

Понятно, опредѣленіе настоящаго момента для включенія требуетъ нѣкотораго навыка. Вообще здѣсь весь процессъ включенія не протекаетъ такъ гладко, какъ при постоянномъ токѣ, такъ какъ ни число оборотовъ,

ни совпаденіе фазъ нельзя установить съ математическою точностью. Но подобнаго рода точности вовсе и не требуется, такъ какъ тотчасъ же по включеніи начнетъ дѣйствовать синхронизирующая сила якоря, которая скоро установитъ полный синхронизмъ.

Тогда, пока машина будетъ работать еще безъ нагрузки, у насъ будутъ имѣться тѣ же явленія, что и при постоянномъ токѣ. Давленіе и противодавленіе, равныя по величинѣ, включены другъ другу навстрѣчу и сила тока и мощность будутъ пока равны нулю. Принципіальная разница въ работѣ параллельно включенныхъ машинъ постояннаго и перемѣннаго токовъ наступитъ только тогда, когда мы перейдемъ къ разсмотрѣнію способовъ и характера нагрузки ихъ.



Фиг. 274. Фиг. 275.

Разсмотримъ сначала случай, когда работающая въ-холостую шунтовая машина будетъ включена въ сѣть, которая питается уже нѣсколькими большими машинами. Нагрузимъ, затѣмъ, эту шунтовую машину, для чего усилимъ возбужденіе машины, а отсюда и электродвижущую силу. Отъ этого возрастаетъ сила тока въ якорѣ, согласно уравненію:

$$i_a = \frac{E - e}{w_a}.$$

Съ усиленіемъ тока въ якорѣ увеличится и полная электрическая мощность $E \cdot i_a$. Сообщаемая до этого момента механическая энергія оказывается уже недостаточной, наступаетъ замедленіе, которое влечетъ за собою опусканіе шаровъ у регулятора. Вслѣдствіе этого въ машину уже дальше будетъ входить больше пару, а механическая энергія, сообщаемая

теперь динамо, будетъ равна расходуемой электрической энергіи. Такъ какъ расходъ тока во внѣшней цѣпи, мы предполагаемъ, остается безъ измѣненія, то мощность нашей отдѣльной машины можетъ возрасти только оттого, что другія машины въ этотъ моментъ будутъ разгружены. Воздѣйствіе этихъ другихъ машинъ можетъ сказаться, конечно, только въ томъ, что въ этотъ моментъ измѣнится немного напряженіе у зажимовъ, что, однако, совершенно не существенно для нашего разсужденія.

Необходимо при этомъ обратить вниманіе на то, что увеличеніе электрической энергіи было замѣтно продолжительнымъ, и что поэтому и расходъ пара также продолжительное время возросталъ. Шары регулятора стоятъ теперь въ другомъ положеніи, и число оборотовъ по сравненію съ холостымъ ходомъ понизилось. Но это уменьшеніе числа оборотовъ столь незначительно, что въ практическомъ машиностроеніи его оставляютъ безъ вниманія. Теперь резюмируемъ все сказанное: Итакъ, при шунтовой машинѣ нагрузка мѣняется путемъ измѣненія возбужденія. Динамо воздѣйствуетъ здѣсь обратно на паровую машину, при чемъ число оборотовъ измѣняется незначительно, а сообщаемая механическая энергія измѣняется довольно сильно. Въ этомъ случаѣ предложеніе соотвѣтствуетъ спросу, т. е. паровая машина доставляетъ то, что́ требуетъ динамо.

Совсѣмъ иныя явленія происходятъ при машинѣ перемѣннаго тока. Мы и въ этомъ случаѣ предположимъ, что къ сѣти, которая питается нѣсколькими большими машинами, приключается небольшая машина. Тогда на напряженіе у зажимовъ и число оборотовъ большихъ машинъ совершенно не будутъ вліять измѣненія, происходящія въ малой машинѣ. Слѣдовательно, мы можемъ считать число періодовъ и напряженіе у зажимовъ постоянными. Теперь спрашивается, какъ мы должны нагружать машину? Первою мыслью, понятно, является — повысить возбужденіе, а совмѣстно съ этимъ увеличить и электродвижущую силу E_1.

При перевозбужденіи мы получимъ увеличеніе силы тока, но, противъ нашихъ ожиданій, не получимъ никакого увеличенія отклоненія ваттметра и, что́ самое главное, никакого увеличенія расхода пара. Если, несмотря на увеличеніе электродвижущей силы и силы тока, не происходитъ никакого измѣненія мощности, то мы должны заключить, что одновременно же увеличился и сдвигъ фазъ между E_1 и i, такъ какъ только въ этомъ случаѣ мощность можетъ оставаться безъ измѣненія.

На самомъ дѣлѣ и немыслимо, чтобы мощность могла измѣняться путемъ измѣненія возбужденія. Машина перемѣннаго тока работаетъ или строго въ тактъ, или выпадаетъ изъ синхронизма. Поэтому паровая машина

и послѣ измѣненія возбужденія динамо продолжаетъ работать по прежнему соразмѣрно старому такту, и потому шары регулятора не измѣняютъ своего положенія. Притокъ пара остается безъ измѣненія и мощность остается прежней. И дѣйствительно, паровая машина, напримѣръ, въ первое время послѣ включенія постоянно даетъ работу, равную холостой нагрузкѣ, хотя возбужденіе машины мы уже и измѣнили. Поэтому увеличеніе мощности машины можетъ быть достигнуто только путемъ механическаго перемѣщенія грузовъ регулятора. Эта перестановка производится или отъ руки, или посредствомъ небольшого электродвигателя, помѣщеннаго на регуляторѣ и пускаемаго въ ходъ съ распредѣлительнаго щита. Этимъ достигаютъ того, что, притокъ пара при постоянномъ числѣ оборотовъ, къ чему понуждаетъ машину число періодовъ сѣти, возрастаетъ. Слѣдовательно, для измѣненія электрической мощности динамо мы должны измѣнять сообщаемую ей механическую энергію. Здѣсь уже потребленіе согласуется съ предложеніемъ, т. е. динамо отдаетъ такую электрическую мощность, которую ей сообщаетъ паровая машина.

Теперь спрашивается, что же заставляетъ динамо принаравливать доставляемую ею мощность сообщаемой ей механической энергіи? Интересно то, что увеличеніе впуска пара влечетъ за собою механическое опереженіе, благодаря чему векторъ электродвижущей силы, по отношенію напряженія у зажимовъ, перемѣстится впередъ. Поэтому электрическая энергія, доставляемая машиной, будетъ увеличиваться до тѣхъ поръ, пока она не будетъ оказывать достаточное сопротивленіе паровой машинѣ. Такимъ образомъ мощность машины можно увеличивать произвольно только до тѣхъ поръ, пока машина не станетъ работать вблизи своей максимальной мощности, т. е. когда для нея не наступитъ опасность выпасть изъ синхронизма.

Точно такое же различіе существуетъ и между выключеніемъ изъ сѣти машины постояннаго тока и перемѣннаго. Шунтовая машина до выключенія разгружается, для чего уменьшаютъ ея возбужденіе и уничтожаютъ тѣмъ самымъ въ машинѣ токъ. Машина же перемѣннаго тока остается передъ выключеніемъ безъ тока благодаря тому, что путемъ перестановки грузовъ регулятора уменьшаютъ впускъ пара.

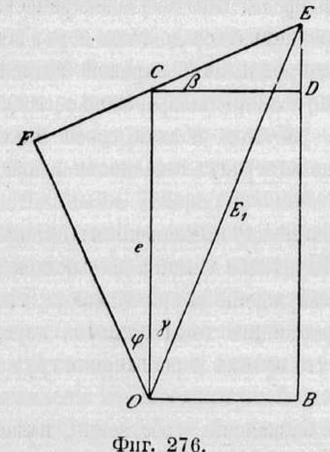
Но является еще вопросъ, какое же назначеніе, собственно, имѣетъ автоматическій регуляторъ паровой машины, когда число оборотовъ динамо, а стало быть и число оборотовъ машины-двигателя, строго устанавливается числомъ періодовъ въ сѣти. Совершенно вѣрно, что регуляторъ каждой машины въ отдѣльности можетъ быть закрѣпленъ на мѣстѣ, не вызывая во всей системѣ какое-либо измѣненіе; но если увеличеніе расхода электри-

ческой энергіи, зависящее отъ произвола потребителей, должно равномѣрно распредѣлиться на всѣ машины, то на всѣхъ машинахъ должны работать автоматическіе регуляторы. При уменьшеніи числа періодовъ они заставляютъ паръ входить повсюду въ бо́льшемъ количествѣ. Тогда, понятно, является возможность уменьшившееся число періодовъ снова довести до прежнихъ размѣровъ посредствомъ механическаго перемѣщенія грузовъ регулятора.

Далѣе возникаетъ еще одинъ вопросъ: каково же вліяніе измѣненія возбужденія, если оно не вызываетъ, подобно тому, какъ у машинъ постояннаго тока, увеличенія мощности? Тотъ фактъ, что увеличеніе возбужденія всѣхъ машинъ должно повысить напряженіе у зажимовъ, очевиденъ самъ по себѣ. Но насъ интересуетъ собственно другой вопросъ, а именно каково вліяніе измѣненія возбужденія одной какой-либо машины на самую эту машину, при чемъ предполагается, что напряженіе у зажимовъ всей сѣти благодаря этому измѣнится незначительно? Отвѣтъ на этотъ вопросъ будетъ данъ въ слѣдующей статьѣ.

101. Машины перемѣннаго тока при измѣненіи возбужденія.

Мы разсмотримъ въ этой статьѣ машину перемѣннаго тока, которая включена въ сѣть съ постояннымъ напряженіемъ и которой машиною-двигателемъ сообщается постоянная энергія. Спрашивается теперь, какое измѣненіе въ силѣ тока и въ сдвигѣ фазъ произведетъ измѣненіе возбужденія?



Фиг. 276.

Ради упрощенія предположимъ опять сначала, что сопротивленіе якоря равно нулю, тогда, согласно стр. 416, сообщаемая мощность:

$$P_1 = \frac{E_1 \cdot e}{L\omega} \cdot \sin\gamma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (a)$$

Такъ какъ въ этомъ случаѣ величины $L\omega$ и P_1 постоянны, то отсюда вытекаетъ, что и площадь треугольника OCE постоянна (фиг. 276). При измѣненіи возбужденія и электродвижущей силы E_1, точка E перемѣщается по прямой, параллельной e и проведенной на разстояніи отъ нея CD. Тогда имѣемъ:

$$CE = L \cdot \omega \cdot i.$$

Для возбужденія OD имѣемъ $L \cdot \omega \cdot i = CD$, т. е. оно принимаетъ наименьшее значеніе. Одновременно $\sin\gamma = \frac{CD}{E_1}$ или, на основаніи уравненія (a):

$$CD = \frac{P_1 \cdot L\omega}{e}.$$

При этомъ векторъ тока, перпендикулярный самоиндукціи CD, совпадаетъ съ направленіемъ вектора напряженія у зажимовъ. Машина тогда доставляетъ въ сѣть ваттный токъ.

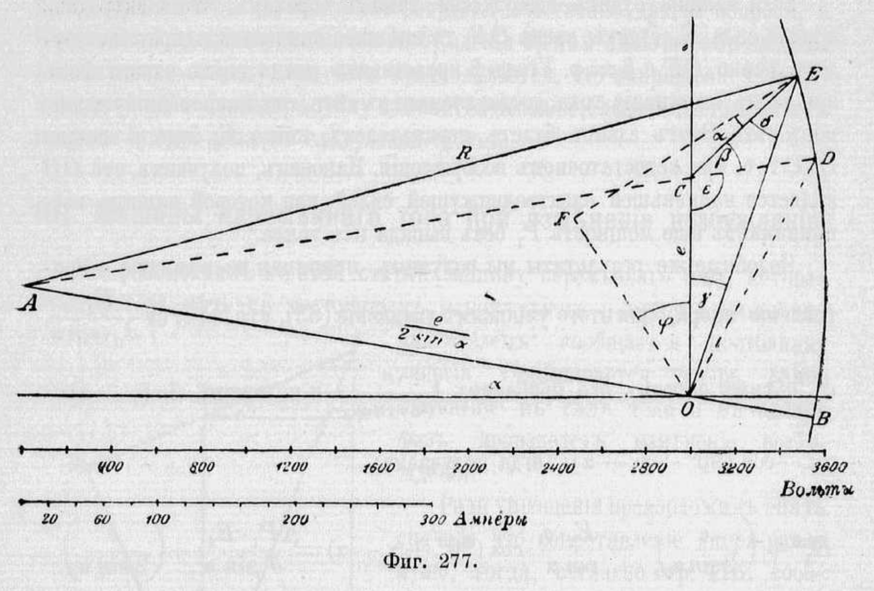
Если машина будетъ возбуждена такимъ образомъ, что электродвижущая сила E_1 будетъ равна OE, то внѣшнее омическое напряженіе будетъ равно OF и $\beta = \varphi$. Уголъ β представитъ тогда уголъ сдвига фазъ или уголъ отставанія тока, доставляемаго въ сѣть, отъ напряженія у зажимовъ сѣти. Этотъ сдвигъ будетъ отрицателенъ, когда E_1 будетъ меньше OD, т. е. при недостаточномъ возбужденіи. Наконецъ, получаемъ, что OB является наименьшей электродвижущей силой, при которой машина воспринимаетъ еще мощность P_1 безъ выпада изъ такта.

Подобные же результаты мы получимъ, принимая во вниманіе сопротивленіе якоря. Для этого умножимъ уравненіе (63), стр. 417, на $\frac{E_1}{J_0 \cdot \sin\alpha}$, къ обѣимъ частямъ его прибавимъ $\left(\frac{e}{2\sin\alpha}\right)^2$ и положимъ $\sin(\gamma - \alpha) = -\cos(90^\circ + \gamma - \alpha)$. Тогда получаемъ:

$$E_1^2 + \left(\frac{e}{2\sin\alpha}\right)^2 - \frac{E_1 \cdot e}{\sin\alpha} \cdot \cos(90^\circ + \gamma - \alpha) = \frac{P_1 \cdot E_1}{J_0 \sin\alpha} + \left(\frac{e}{2\sin\alpha}\right)^2.$$

Мы замѣчаемъ, что частное $\frac{E_1}{J_0}$ при всѣхъ возбужденіяхъ постоянно равно внутреннему кажущемуся сопротивленію; тогда отсюда заключаемъ, что вмѣсто правой части нашего уравненія можемъ подставить постоянную величину R^2. Изъ этого уравненія мы видимъ, что долженъ существовать треугольникъ, сторонами котораго будутъ E_1, $e/2\sin\alpha$ и R, и уголъ между первыми двумя будетъ $90^\circ + \gamma - \alpha$. Отсюда вытекаетъ очень простая діаграмма, которая для каждаго значенія E_1 даетъ намъ непосредственно соотвѣтствующій уголъ γ между электродвижущей силой и напряженіемъ у зажимовъ. Отложимъ на фиг. 277 отъ O вдоль оси ординатъ отрѣзокъ

OC, равный e, и проведемъ векторъ $OA = e/2 \cdot \sin \alpha$ такимъ образомъ, чтобы онъ образовалъ съ осью абсциссъ уголъ α. Точка A должна находиться тогда на половинной высотѣ по сравненію съ точкой C. Изъ точки A, какъ изъ центра, описываемъ радіусомъ R окружность и проводимъ затѣмъ подъ нѣкоторымъ угломъ γ къ оси ординатъ векторъ, который пересѣчетъ окружность въ точкѣ E. Тогда треугольникъ OAE будетъ искомымъ треугольникомъ, такъ какъ стороны его $e/2 \sin \alpha$ и R образуютъ требуемый уголъ $AOE = 90° + \gamma - \alpha$. Поэтому векторъ OE равенъ электродвижущей силѣ E_1, соотвѣтствующей углу γ. И наоборотъ, такъ какъ точка E постоянно находится на окружности, то для данной электродвижущей



Фиг. 277.

силы E_1 очень просто получить и соотвѣтствующій ей уголъ γ. Діаграмма вычерчена для указанныхъ уже раньше данныхъ:

$$e = 1\,000, \qquad w_a = 1, \qquad L\omega = 6,$$

и кромѣ того еще предположено, что машинѣ сообщается постоянная мощность $P_1 = 100\,000$ ваттъ. Понятно, что для опредѣленнаго состоянія работы, а именно для выбранной уже раньше электродвижущей силы $E_1 = 1\,200$ вольтъ, эта діаграмма должна дать тотъ же уголъ γ, что и на фиг. 272 для мощности $P_1 = 100\,000$ ваттъ. Здѣсь необходимо указать, что эта мощность при указанныхъ выше данныхъ намѣренно взята чрезмѣрно большою, дабы получить болѣе ясную діаграмму.

Теперь мы можемъ прослѣдить вліяніе измѣненія возбужденія. Чѣмъ больше мы станемъ уменьшать возбужденіе, слѣдовательно, и электродвижущую силу, тѣмъ больше будетъ, согласно нашей діаграммѣ, уголъ γ, тѣмъ ниже будетъ опускаться точка E. Это согласуется и съ данными изъ практики, когда съ уменьшеніемъ электродвижущей силы въ первый моментъ связано уменьшеніе и доставляемой электрической энергіи. Вслѣдствіе этого въ теченіе небольшого промежутка времени мощность машины-двигателя будетъ больше, и потому уголъ γ начнетъ возрастать до тѣхъ поръ, пока электрическая мощность снова не уравновѣситъ прилагаемую механическую энергію.

Но при дальнѣйшемъ ослабленіи возбужденія уголъ γ станетъ столь большимъ, что векторъ электродвижущей силы E совпадаетъ съ OA и станетъ равнымъ OB. Этотъ векторъ OB представляетъ собою наименьшую электродвижущую силу, при которой динамо еще будетъ потреблять механическую энергію въ 100 000 ваттъ. Мы можемъ сказать и наоборотъ: мощность въ 100 000 ваттъ будетъ самою большею, какая только при возбужденіи $E_1 = OB$ можетъ быть сообщаема машинѣ. Если же возбужденіе уменьшится еще дальше или увеличится сообщаемая энергія, или машина сама, вслѣдствіе какой-либо причины, начнетъ вращаться быстрѣе, то она выпадетъ изъ синхронизма. Здѣсь опять мы замѣчаемъ аналогію съ діаграммою мощности на стр. 417, такъ какъ выпаденіе изъ синхронизма произойдетъ, какъ и раньше, при углѣ сдвига фазъ въ $90° + \alpha$. Здѣсь опять мы видимъ, что для того, чтобы динамо навѣрное работала синхронично, необходимо уголъ γ выбирать небольшимъ.

Очень важно знать, какимъ же образомъ нужно возбуждать динамо для того, чтобы при данной сообщаемой энергіи она работала съ наибольшимъ коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія. Потери въ якорѣ пропорціональны квадрату силы тока въ якорѣ. Векторъ CE, фиг. 277, даетъ величину силы тока, такъ какъ треугольникъ OCE равнозначущъ съ треугольникъ BOF основной діаграммы (фиг. 252). Слѣдовательно, мы получаемъ, подобно тому какъ въ статьѣ 98:

$$CE = i \cdot \sqrt{w_a^2 + (L\omega)^2}.$$

или

$$i = \frac{CE}{\sqrt{w_a^2 + (L\omega)^2}}.$$

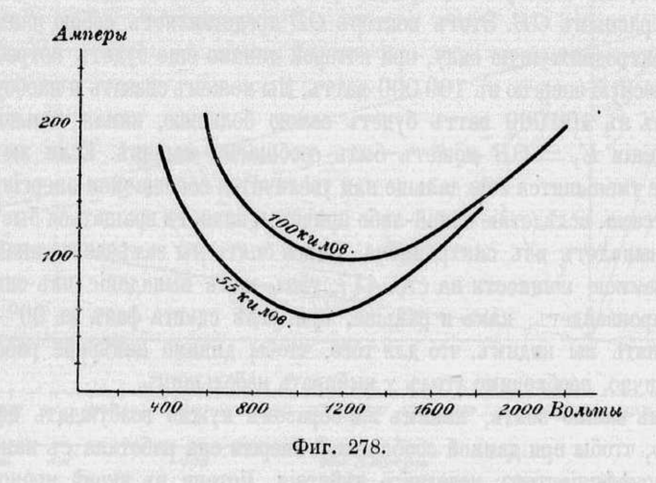
Обращаясь къ прежнимъ даннымъ $w_a = 1$, $L\omega = 6$, мы получаемъ, для масштаба силы тока, слѣдующее соотношеніе:

$$i = \frac{197}{1\,200} \cdot CE = 0{,}164\ CE.$$

Наибольшій коэффиціентъ полезнаго дѣйствія будетъ достигнутъ тогда, когда только незначительная часть прилагаемой энергіи превратится въ тепло Джоуля $i^2 \cdot w_a$. Это будетъ имѣть мѣсто тогда, когда сила тока будетъ наименьшею, т. е. когда векторъ CE явится продолженіемъ AC и совпадетъ съ CD. Стало быть, наиболѣе выгодною электродвижущею силою будетъ $OD = 1\,220$ вольтъ и сила тока при этомъ, согласно масштабу амперъ, $CD = 91{,}6$ амперъ. Потеря на тепло Джоуля составитъ тогда

$$i^2 \cdot w_a = 91{,}6^2 \cdot 1 = 8\,400 \text{ ваттъ.}$$

Эта величина, безъ сомнѣнія, при полной мощности въ 100 000 ваттъ очень велика. Но уже раньше указывалось на то, что ради ясности чер-



Фиг. 278.

тежа соотношенія здѣсь были выбраны ненормальными. Когда же потери являются наименьшими, то при заданной полной мощности полезная мощность будетъ наибольшею. Слѣдовательно, мы получаемъ полезную мощность

$$P_{max} = 100\,000 - 8\,400 = 91\,600 \text{ ваттъ.}$$

Для каждаго другого возбужденія, при которомъ точка E находится выше или ниже точки D, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія будетъ хуже, такъ какъ сила тока будетъ больше. Но вблизи точки D это не имѣетъ особенно существеннаго значенія, такъ какъ здѣсь возбужденіе можетъ измѣняться въ довольно большихъ предѣлахъ безъ того, чтобы это вызывало существенныя измѣненія въ силѣ тока.

Это станетъ еще болѣе понятнымъ, если нанесемъ электродвижущія силы по оси абсциссъ, а силы тока по оси ординатъ. Мы получимъ тогда такъ называемую кривую V (фиг. 278). На этой фигурѣ въ качествѣ абсциссъ отложены значенія OE, а въ качествѣ ординатъ значенія CE, взятыя изъ фигуры 277. Мы видимъ ясно, что сила тока при постоянной сообщаемой энергіи для опредѣленнаго возбужденія будетъ минимумъ. Лѣвая часть этой кривой будетъ той частью, гдѣ машина при продолжающемся ослабленіи возбужденія приближается къ опасному моменту выпаденія изъ синхронизма.

На практикѣ вмѣсто электродвижущей силы откладываютъ по оси абсциссъ возбужденіе или намагничивающій токъ, вслѣдствіе чего характеръ очертанія кривой V нѣсколько измѣняется.

Изъ діаграммы на фиг. 277 ясно, когда окружность располагается далеко отъ оси ординатъ, т. е. когда CD очень велико, то измѣненіе электродвижущей силы OE мало вліяетъ на силу тока CE. Большое паденіе напряженія въ якорѣ, слѣдовательно, бóльшая самоиндукція $L\omega \cdot i$ дѣлаетъ, поэтому, машину сравнительно малочувствительной къ измѣненію возбужденія. Кривая V становится тогда внизу сравнительно плоскою.

Наоборотъ, машины съ незначительною внутренней потерею напряженія $L\omega \cdot i$ даютъ болѣе остроконечную кривую V. Для вычерчиванія подобной кривой мы должны были бы все построеніе на фиг. 277 произвести снова для той же мощности, но для меньшаго $L\omega$. Но мы можемъ уменьшить величину $L\omega \cdot i$ также тѣмъ, что заставимъ машину работать съ меньшею силою тока, сообщая ей, напримѣръ, половину энергіи. Тогда окружность радіуса R пройдетъ приблизительно посрединѣ CD, и измѣненіе возбужденія будетъ вліять тогда на силу тока сравнительно сильнѣе. Мы получимъ, такимъ образомъ, на фиг. 278 болѣе изогнутую кривую.

Мы приходимъ, такимъ образомъ, къ слѣдующему положенію: машины съ незначительной самоиндукціей при измѣненіи возбужденія при прочихъ равныхъ условіяхъ даютъ болѣе остроконечную кривую V, чѣмъ машины съ большой самоиндукціей. Равнымъ образомъ одна и та же машина при незначительной нагрузкѣ даетъ болѣе изогнутую кривую V, чѣмъ при большой нагрузкѣ. Болѣе значительная изогнутость кривой V равносильна сильному измѣненію силы тока при измѣненіи возбужденія.

Теперь опредѣлимъ коэффиціентъ мощности для энергіи, отдаваемой нашей машиною данной сѣти. Вообще, уголъ φ между напряженіемъ у зажимовъ и силою тока мы получаемъ, если на фиг. 277 проведемъ отрѣ-

зокъ EF такимъ образомъ, что онъ будетъ образовывать съ EC уголъ α, и изъ O опустимъ на него перпендикуляръ. Мы безъ труда тогда увидимъ въ треугольникѣ EOF фигуру 252, на стр. 393, и въ углѣ COF искомый уголъ φ. Принимая во вниманіе обозначенія на фиг. 277, мы получаемъ:

$$\frac{e}{2} = OA \cdot sin\alpha\,.$$

Слѣдовательно, треугольникъ OAC будетъ треугольникомъ равнобедреннымъ, и векторъ AC образуетъ съ осью абсциссъ уголъ α. Отсюда слѣдуетъ:

$$\varepsilon = 90^\circ + \alpha\,.$$

Далѣе

$$\varphi + \gamma = 90^\circ - (\alpha + \delta)$$

и

$$180^\circ = \varepsilon + \beta + \gamma + \delta\,.$$

Сложивъ эти три уравненія, получаемъ:

$$\varphi = \beta.$$

Слѣдовательно, уголъ сдвига есть уголъ между прямыми CD и CE. Возбудимъ, теперь, машину такимъ образомъ, чтобы ея электродвижущая сила равнялась OD, тогда уголъ β, а, слѣдовательно, и уголъ φ будутъ равны нулю. Машина въ этомъ случаѣ будетъ доставлять въ сѣть только ваттный токъ. Это согласуется и съ нашими вышепроизведенными расчетами, согласно которымъ для точки D полезная мощность составляла 91 600 ваттъ. Такъ какъ сила тока при этомъ равнялась 91,6 ампера, а напряженіе у зажимовъ 1 000 вольтъ, то $cos\varphi$ необходимо долженъ быть равнымъ 1.

Казалось бы, что очень хорошо возбуждать машину именно такимъ образомъ, чтобы $cos\varphi$ равнялся 1, а сила тока и потери при данной мощности были наименьшими. Но это неправильно. Если во внѣшней сѣти, вслѣдствіе существующей въ ней самоиндукціи, появится сдвигъ фазъ, а наша машина будетъ доставлять только ваттный токъ, то тогда остальныя машины должны будутъ доставлять больше безваттнаго тока. Поэтому, лучше возбуждать машины такимъ образомъ, чтобы безваттные токи распредѣлялись равномѣрно на всѣ машины, слѣдовательно, чтобы сдвигъ фазъ у всѣхъ былъ одинаковъ.

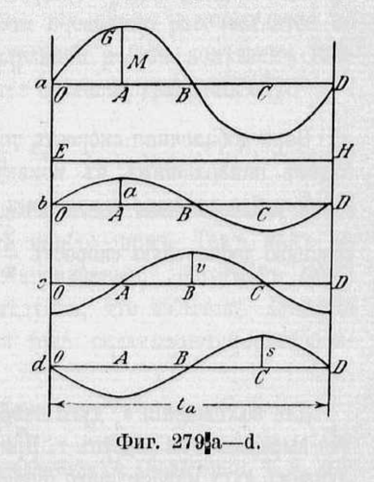
Если же мы возбудимъ нашу машину чрезмѣрно сильно, то точка E перемѣстится кверху, и мы получимъ большой сдвигъ фазы тока по отношенію къ напряженію у зажимовъ; машина доставляетъ тогда въ сѣть преимущественно безваттный токъ. Наоборотъ, точка E опустится внизъ, когда мы возбуждаемъ машину слабо. У такой невозбужденной машины уголъ β, т. е. уголъ φ, будетъ отрицательнымъ, стало быть, сила тока опережаетъ напряженіе у зажимовъ. Въ то же время электродвижущая сила E_1 будетъ меньше напряженія у зажимовъ. Это будетъ, напримѣръ, тогда, когда машина будетъ работать на перевозбужденный синхронный двигатель, противоэлектродвижущая сила котораго будетъ больше электродвижущей силы генератора. Наряженіе сѣти, включенной между двигателемъ и генераторомъ, составляетъ тогда приблизительно среднее ариѳметическое обѣихъ электродвижущихъ силъ, стало быть, больше электродвижущей силы генератора.

Вся заслуга нашей діаграммы состоитъ въ томъ, что она не только позволяетъ непосредственно прочитывать электродвижущія силы, но также и силы тока и сдвиги фазъ во внѣшней цѣпи. Кромѣ того, изъ нея ясно видна зависимость между механическими и электрическими явленіями, которыя вызываются измѣненіемъ возбужденія.

102. Колебанія машинъ перемѣннаго тока.

Когда машина перемѣннаго тока приводится въ движеніе паровою машиною или двигателемъ внутренняго сгоранія, то она періодически при каждомъ оборотѣ ускоряется и замедляется, что обусловливается неравномѣрнымъ вращающимъ моментомъ машины-двигателя. Если машина включена параллельно съ другими машинами въ сѣть, то она вслѣдствіе синхронизирующей силы якоря подвергается періодически измѣняющимся толчкамъ.

1. Для уясненія имѣющихъ здѣсь мѣсто явленій, разсмотримъ сначала самостоятельно работающую на сѣть машину, которая подвержена дѣйствію періодически измѣняющагося вращающаго момента. Пусть на фиг. 279a, ординаты кривой OGB, измѣряемыя отъ EH, представляютъ вращающій моментъ, дѣйствующій на машину. Если OE представляетъ средній вращающій моментъ, то ординаты кривой OGB, измѣренныя отъ OD, представятъ добавочный вращающій моментъ. При-



Фиг. 279a—d.

мемъ, что этотъ послѣднiй является синусоидальной функцiей времени. Пусть:

M_a наибольшiй добавочный вращающiй моментъ машины-двигателя,
m масса вращающихся частей, сосредоточенная на окружности и выраженная въ механическихъ единицахъ,
r радiусъ въ метрахъ,
t_a время, черезъ которое снова получается наибольшiй вращающiй моментъ у машины-двигателя,

тогда наибольшое ускоренiе въ мтр/сек. ^{2} будетъ:

$$a = \frac{M_a}{m \cdot r} \quad \text{(a)}$$

Ускоренiе по фазѣ совпадаетъ съ добавочнымъ вращающимъ моментомъ, слѣдовательно, достигаетъ своего наибольшаго значенiя одновременно съ этимъ послѣднимъ, т. е. на фиг. 279b въ моментъ A. Пока ускоренiе положительно, добавочная скорость возрастаетъ; она достигаетъ своей наибольшей величины v въ моментъ времени, соотвѣтствующiй точкѣ B (фиг. 271c). Ея наибольшое значенiе v въ мтр./сек. опредѣляется изъ средняго ускоренiя $\frac{2}{\pi} \cdot a$ путемъ умноженiя его на время $AB = \frac{t_a}{4}$:

$$v = \frac{2a}{\pi} \cdot \frac{t_a}{4} \quad \text{(b)}$$

Пока добавочная скорость положительна, опереженiе увеличивается и будетъ наибольшимъ въ моментъ времени, соотвѣтствующiй точкѣ C. Наибольшее значенiе опереженiя s въ метрахъ мы получимъ, умножая среднюю добавочную скорость $\frac{2}{\pi} \cdot v$ на время $BC = \frac{t_a}{4}$.

$$s = \frac{2}{\pi} \cdot v \cdot \frac{t_a}{4} \quad \text{(c)}$$

Для нахожденiя ε_a дуги наибольшаго опереженiя необходимо раздѣлить это выраженiе на радiусъ r. При помощи уравненiй (a), (b) и (c) мы получаемъ дугу наибольшаго опереженiя равною:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{M_a}{m \cdot r^2} \cdot t_a^2 \quad \text{(d)}$$

Опереженiе, создаваемое исключительно машиною-двигателемъ, называютъ начальнымъ. Слѣдуетъ замѣтить, что, согласно фиг. 279a и 279d, моментъ времени, въ который достигается наибольшее опереженiе, совпадаетъ съ моментомъ наибольшаго вращающаго добавочнаго момента.

2. Заставимъ, теперь, машину работать параллельно съ другими машинами на сѣть. Мы знаемъ, что машина, согласно статьѣ 99, при отставанiи разгружается, а при опереженiи затормаживается. Это явленiе можно разсматривать такимъ образомъ, что машина постоянно отдаетъ сѣти одинаковую энергiю, но одновременно же получаетъ отъ сѣти обратно энергiю, которая при отставанiи положительна, а при опереженiи отрицательна. Кромѣ избытка давленiя M_a машины-двигателя дѣйствуетъ еще давленiе отъ синхронизма M_w машины перемѣннаго тока, которое своего положительнаго наибольшаго значенiя M_w достигаетъ также въ моментъ наибольшаго отставанiя. Время, черезъ которое оно снова достигаетъ своего наибольшаго значенiя, равно вышеуказанному времени t_a, такъ какъ машина-двигатель сообщаетъ всей системѣ свою равномѣрность хода. Мы можемъ опять принять, что давленiе, вызываемое синхронизмомъ, является синусоидальной функцiей времени.

Избытокъ давленiя машины-двигателя и давленiе, вызываемое синхронизмомъ машины перемѣннаго тока, даютъ результирующую, наибольшое значенiе которой обозначимъ черезъ M. Эта послѣдняя располагается по ординатѣ GA на фиг. 279a, и при параллельной работѣ получаемъ наибольшое опереженiе ε, которое опредѣляется согласно уравненiя (d):

$$\varepsilon = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{M}{m \cdot r^2} \cdot t_a^2 \quad \text{(e)}$$

Отставанiе, согласно фиг. 279d, будетъ опять наибольшимъ, когда результирующiй избытокъ давленiя будетъ наибольшимъ. Такъ какъ въ этотъ моментъ давленiе, создаваемое синхронизмомъ, достигаетъ своей наибольшей величины M_w, то отсюда слѣдуетъ, что избытокъ давленiя машины-двигателя и машины перемѣннаго тока складываются алгебраически въ общее давленiе, т. е.

$$M = M_w \pm M_a.$$

Изъ уравненiй (d) и (e) получаемъ коэффицiентъ увеличенiя, т. е. отношенiе опереженiя при нормальной работѣ къ опереженiю при работѣ одной машины:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_a} = \frac{M}{M_a} \quad \text{(f)}$$

Для нахожденія болѣе простой зависимости между наибольшимъ опереженіемъ ε и наибольшимъ давленіемъ M_w, создаваемымъ синхронизмомъ, замѣтимъ, что машина перемѣннаго тока, если мы станемъ передовать ей равномѣрный вращающій моментъ и если она случайно немного выпадетъ изъ такта, при одинаковомъ опереженіи ε будетъ развивать одинаковый синхронизирующій моментъ M_w. Если t_w будетъ время собственныхъ колебаній, то, согласно уравненію (d):

$$\varepsilon = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{M}{m \cdot r^2} \cdot t_w^2 \quad \dots \dots \dots \dots \quad (g)$$

Частное $\frac{M_w}{\varepsilon}$ будетъ вращающимъ моментомъ для единицы механической дуги или такъ называемая выравнивающая сила D, которая опредѣляется согласно статьѣ 99 и которая почти не зависитъ отъ величины опереженія. Выравнивающую силу, т. е. вращающій моментъ для единицы механической дуги, получаемъ изъ синхронизирующей силы $\frac{dP_1}{d\gamma}$, если вслѣдствіе разности между единицами механической и электрической дугъ умножимъ на p, раздѣлимъ на 9,81 и на механическую угловую скорость $2\pi \cdot \frac{\omega}{p}$ и перейдемъ отъ мощности къ вращающему моменту. Можно $cos(\gamma - \alpha)$ въ круглыхъ числахъ принять равнымъ 1.

Изъ уравненія (g) мы получаемъ время собственныхъ качаній

$$t_w = 2\pi \sqrt{\frac{m \cdot r^2}{D}},$$

выраженіе, которое извѣстно изъ механики и изъ уравненій (e) и (g)

$$\frac{t_w^2}{t_a^2} = \frac{M}{M_w} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (h)$$

Мы различаемъ три случая.

1 случай: $t_w > t_a$.

Это явленіе, когда время собственныхъ качаній t_w машины больше времени колебаній t_a машины-двигателя, является обычнымъ случаемъ у генераторовъ. Тогда, согласно послѣднему уравненію, M больше M_w, т. е.

$$M = M_w + M_a.$$

Подставивъ это выраженіе для M въ уравненія (f) и (h) и исключивъ тогда, послѣ раздѣленія правой части, выраженіе $\frac{M_a}{M_w}$, получимъ коэффиціентъ увеличенія:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_a} = \frac{1}{1 - \frac{t_a^2}{t_w^2}} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (i)$$

Положимъ

$$m = 720 \qquad r = 2{,}75 \qquad p = 32$$
$$\omega = 48{,}5 \qquad e = 3\,000 \qquad J_0 = 670$$

тогда, согласно вышеуказанному уравненію для t_w, время собственныхъ качаній будетъ:

$$t_w = 0{,}55.$$

Если, напримѣръ, машиной-двигателемъ будемъ имѣть тандемъ-машину съ 85 оборотами въ минуту, т. е. съ $2 \cdot \frac{85}{60}$ періодовъ въ секунду, то будемъ имѣть:

$$t_a = \frac{1}{2 \cdot \frac{85}{60}} = 0{,}353.$$

Коэффиціентъ увеличенія тогда, согласно уравненію (i), будетъ:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_a} = 1{,}7 \cdot$$

Процессъ проходитъ въ этомъ случаѣ такимъ образомъ, что опереженія съ каждымъ періодомъ постоянно становятся все больше, приближаясь къ опредѣленному конечному предѣлу. Синхронизирующій моментъ, соотвѣтствующій этому опереженію, является вполнѣ достаточнымъ, чтобы въ связи съ добавочнымъ вращающимъ моментомъ машины-двигателя создавать данное опереженіе.

2 случай: $t_w < t_a$.

Согласно уравненію (h), M меньше тогда M_w. Это обозначало бы, что въ этомъ случаѣ въ моментъ наибольшаго отставанія, машина-двигатель развивала бы свой наименьшій вращающій моментъ, но вслѣдствіе большой синхронизирующей силы динамомашины ускореніе, противъ ожиданія, все же появилось бы. Тогда имѣетъ мѣсто уравненіе:

$$M = M_w - M_a.$$

Подобно предыдущему, изъ уравн. (f) и (h) получаемъ коэффиціентъ увеличенія:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_a} = \frac{1}{\frac{t_a^2}{t_w^2} - 1} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (k)$$

Случай, когда собственныя качанія машины перемѣннаго тока меньше собственныхъ качаній машины-двигателя, практически у генераторовъ почти невыполнимъ, такъ какъ онъ требуетъ очень незначительныхъ колеблющихся массъ и большого начальнаго опереженія. Но для синхронныхъ двигателей и въ особенности для вращающихся преобразователей этотъ случай очень важный. У этихъ послѣднихъ изъ-за неравномѣрности хода машины-двигателя получается приблизительно періодичное измѣненіе нагрузки.

3 случай: $t_w = t_a$.

Когда время собственныхъ качаній машины перемѣннаго тока равно времени колебанія машины-двигателя, то коэффиціентъ увеличенія, согласно уравн. (i) и (k), равенъ безконечности. Въ этомъ случаѣ получается полный резонансъ, опереженія съ каждымъ колебаніемъ становятся все больше и больше, машины раскачиваются и выпадаютъ изъ синхронизма. Для избѣжанія этой опасности, необходимо разность между этими двумя временами колебаній сдѣлать наивозможно большею. Этого достигаютъ обыкновенно путемъ увеличенія колеблющихся массъ. Такъ какъ обыкновенно время собственныхъ качаній машинъ перемѣннаго тока уже больше послѣднихъ машины-двигателя, то увеличеніе качающихся массъ первымъ долгомъ создаетъ еще большую разность между временами собственныхъ качаній обѣихъ машинъ. Такъ какъ вслѣдствіе увеличенія колеблющихся массъ въ то же время уменьшится начальное опереженіе, то это является дальнѣйшимъ, но второстепеннымъ преимуществомъ.

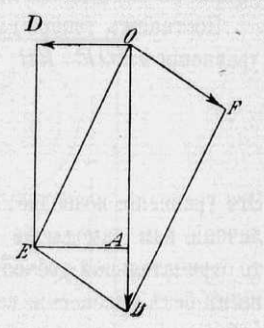
Если же время собственныхъ качаній машины перемѣннаго тока будетъ все же меньше времени собственныхъ качаній машины-двигателя, то увеличеніе колеблющихся массъ сблизитъ времена собственныхъ качаній этихъ машинъ. Въ этомъ случаѣ уменьшеніе колеблющихся массъ послужитъ средствомъ для избѣжанія резонанса.

Вторымъ способомъ для болѣе лучшаго обезпеченія параллельной работы является включеніе между генераторомъ и собирательными шинами реакціонной катушки.

Вслѣдствіе этого токъ короткаго замыканія J_0 будетъ меньше, выравнивающая сила, согласно стр. 422, слабѣе и время собственныхъ колебаній

t_w, согласо вышеуказанному уравненію для t_w, больше. Это послѣднее, согласно уравненію (i), вызываетъ уменьшеніе коэффиціента увеличенія. И при вращающихся преобразователяхъ очень часто единственнымъ средствомъ для избѣжанія колебаній бываетъ включеніе реакціонной катушки.

Очень важнымъ является также, если только это возможно, третье средство: успокоеніе колебаній, согласно Леблану, посредствомъ токовъ Фуко. Для этого устраиваютъ массивныя полюсныя надставки или въ оконечностяхъ полюсовъ вдоль оси укрѣпляютъ мѣдныя полосы, которыя соединяются между собою въ лобовыхъ частяхъ. При колебаніяхъ машины силовыя линіи, порождаемыя токомъ въ якорѣ, создаютъ въ полюсахъ токи, которые, согласно закону Ленца, препятствуетъ движенію. Такого рода успокоенія особенно рекомендуется устраивать при синхронныхъ двигателяхъ и преобразователяхъ. Это послѣднее средство обладаетъ, кромѣ того, еще тѣмъ преимуществомъ, что мгновенное замедленіе машины при какой-нибудь случайной перегрузкѣ не будетъ значительнымъ. Двигатель иногда не выпадаетъ такъ легко изъ синхронизма, при чемъ обмотка успокоителя дѣйствуетъ, какъ коротко замкнутая обмотка асинхроннаго двигателя.



Фиг. 280.

Но какъ разъ сравненіе съ асинхроннымъ двигателемъ указываетъ на то, что это успокоеніе не всегда достигаетъ своей цѣли. Въ самомъ дѣлѣ, вѣдь въ успокоительной обмоткѣ затормаживающе дѣйствуетъ не тепло Джоуля, а тотъ фактъ, что машина работаетъ дѣйствительно, какъ асинхронный двигатель, который по временамъ то отдаетъ сѣти, то самъ получаетъ энергію. Наибольшая величина этой энергіи и потому наибольшій успокаивающій моментъ M_d получается въ тотъ моментъ, когда скорость v будетъ наибольшею, т. е. когда машина переходитъ свое нормальное положеніе. Эту силу мы можемъ считать пропорціональною скорости. Такъ какъ она препятствуетъ движенію, то изъ фиг. 279с мы находимъ, что въ точкѣ B она имѣетъ свое наибольшее отрицательное значеніе. Слѣдовательно, она опережаетъ равнодѣйствующее давленіе и совпадающее по фазѣ съ M синхронизирующее давленіе на 90°.

Пусть на фиг. 280 обозначаютъ:

$OF = M_a$ добавочный вращающій моментъ машины-двигателя,

OA синхронизирующій моментъ при успокоеніи,

OD вращающій моментъ, развиваемый успокотельной обмоткой,

OB результирующій вращающій моментъ.

Далѣе, согласно уравненію (h), отношеніе результирующаго вращающаго момента M къ синхронизирующему моменту будетъ постоянною величиною и равно $t_w^2 : t_a^2$, безразлично будетъ ли наступать успокоеніе или нѣтъ. При успокоеніи это отношеніе равно $OB : OA$, при машинѣ безъ успокоенія оно равнялось $(M_w + M_a) : M_w$, при чемъ слѣдуетъ замѣтить, что M_w обозначаетъ синхронизирующій моментъ машины безъ успокоенія, слѣдовательно, не равно OA. Приравнивая оба выраженія, имѣемъ:

$$\frac{OB}{OA} = \frac{M_w + M_a}{M_w}$$

или

$$\frac{AB}{OA} = \frac{M_a}{M_w} \quad \text{. . . . .} \quad (l)$$

Поставимъ теперь вмѣсто M_a отрѣзокъ EB и умножимъ обѣ части уравненія на $OE : EB$, то получимъ:

$$\frac{OE \cdot AB}{EB \cdot AO} = \frac{OE}{M_w}.$$

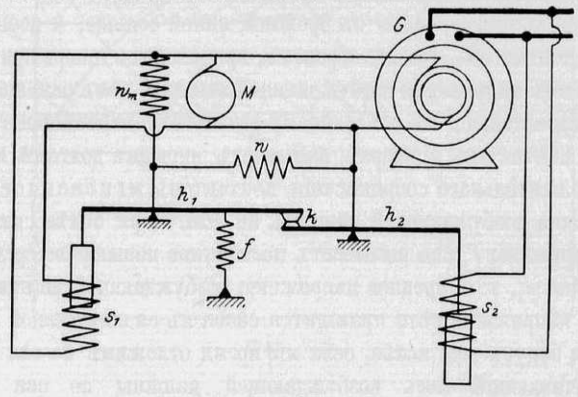
Это уравненіе позволяетъ видѣть, получается ли благодаря успокоенію увеличеніе или замедленіе колебаній мощности въ сѣти. То положительная, то отрицательная добавочная мощность въ сѣти соотвѣтствуетъ при машинѣ безъ успокоенія величинѣ M_w, при машинѣ съ успокоеніемъ суммѣ добавочныхъ синхронной и асинхронной мощностей, т. е. вектору OE. Теперь отношеніе $OE : EB$ приближается больше къ единицѣ, чѣмъ отношеніе $OA : AB$. Поэтому отношеніе $OA : AB$ рѣшаетъ вопросъ, дѣйствительно ли благодаря успокоенію получается уменьшеніе колебаній въ сѣти. Успокоеніе помогаетъ, когда AB меньше OA, т. е. когда, согласно уравн. (l), избытокъ давленія машины-двигателя будетъ меньше синхронизирующаго давленія безъ успокоенія, т. е. когда

$$M < M_w \text{ или } \frac{M_a + M_w}{M_a} > 2.$$

Согласно этому успокоеніе помогаетъ тогда, когда коэффиціентъ увеличенія больше 2, т. е. у машинъ съ сравнительно небольшими колеблющимися массами. Слѣдовательно, успокоитель будетъ имѣть особенное значеніе у тѣхъ машинъ, у которыхъ за одинъ оборотъ будетъ происходить болѣе двухъ толчковъ, такъ какъ тогда колеблющіяся массы могутъ быть сравнительно незначительными.

103. Автоматическое регулированіе напряженія и компаундированіе.

Автоматическое регулированіе напряженія за послѣднее время съ успѣхомъ производится при помощи быстродѣйствующихъ регуляторовъ. Въ послѣдующемъ мы опишемъ только регуляторъ Тиррилля. Схема этого послѣдняго представлена на фиг. 281, при чемъ на ней опущены всѣ детали, не имѣющія существеннаго значенія для пониманія. Къ полюсамъ машины однофазнаго или трехфазнаго токовъ, питающей сѣть, возбуждающій токъ подводится при посредствѣ контактныхъ колецъ. Этотъ токъ доставляется машиною M, обмотка электромагнитовъ которой w_m при промежуточномъ включеніи сопротивленія w приключается къ якорю возбуждающей машины. Сопротивленіе w періодически замыкается на корот-



Фиг. 281.

кое контактомъ k, такимъ образомъ степень возбужденія электромагнитовъ у нея постоянно колеблется. На двуплечный рычагъ h_1, дѣйствуетъ пружина f по направленію часовой стрѣлки, въ то время, какъ электромагнитное взаимодѣйствіе катушки s_1 на желѣзный якорь стремится повернуть этотъ рычагъ по направленію противъ часовой стрѣлки. Катушка s_1 приключена къ зажимамъ возбуждающей машины M. На рычагъ h_2 дѣйствуетъ катуша s_2, которая стремится желѣзный сердечникъ втянуть и поднять его вверхъ, въ то время, какъ вѣсъ желѣзнаго якоря дѣйствуетъ по направленію противоположному. Катушка s_2 приключена къ напряженію сѣти. Весь аппаратъ разсчитанъ такимъ образомъ, что при нормальномъ напряженіи сѣти вѣсъ желѣзнаго стержня въ каждомъ положеніи

уравновѣшивается силою притяженія катушки s_2. Рычагъ h_1 дѣйствуетъ какъ прерыватель у реакціонной катушки, описанной на стр. 110.

Какъ только въ силу какой-либо причины напряженіе въ сѣти упадетъ, сила тяжести у рычага h_2 сердечника преодолѣетъ и рычагъ h_2 немного повернется по часовой стрѣлкѣ. Тогда оба контакта k рычаговъ, которые постоянно періодически замыкаются и размыкаются, будутъ нѣкоторое сравнительно продолжительное время замкнуты, и намагничивающій токъ возбуждающей машины возрастетъ на нѣкоторую величину, которая будетъ больше наибольшаго значенія, достигаемаго до того при каждомъ колебаніи.

Въ то же время благодаря перемѣщенію вверхъ точки соприкасанія контактовъ k натягивается сильнѣе пружина f, и чтобы прервать контактъ, необходимо затратить большее усиліе, чѣмъ раньше.

Сила тока, при которой катушка s_1 втягиваетъ въ себя желѣзный сердечникъ, будетъ по сравненію съ прежней силой больше, и періодическое размыканіе контактовъ, такимъ образомъ, происходитъ теперь при среднемъ болѣе высокомъ напряженіи возбуждающей машины, чѣмъ раньше. Мы приходимъ, слѣдовательно, къ слѣдующему результату: перемѣщеніе точки соприкасанія контактовъ k вверхъ вызываетъ первымъ долгомъ, вслѣдствіе болѣе продолжительнаго соприкасанія контактовъ, мгновенное повышеніе напряженія возбуждающей машины, но, благодаря болѣе сильному напряженію пружины f, оно вызываетъ постоянное повышеніе средней силы тока катушки s_1, т. е. среднее напряженіе возбуждающей машины. Благодаря этому напряженіе сѣти приводится снова къ ея нормальной величинѣ.

Явленія будутъ еще яснѣе, если мы время отложимъ по оси абсциссъ, а намагничивающій токъ возбуждающей машины по оси ординатъ (фиг. 282) [1]). Пусть намагничивающій токъ при постоянно разомкнутыхъ контактахъ будетъ равенъ OA, при постоянно замкнутыхъ OB.

Тогда при короткомъ замыканіи токъ растетъ по кривой c_1, и при включеніи сопротивленія уменьшается по кривой c_2. Кривыя c_1 и c_2 имѣютъ характеръ, подобный кривымъ фиг. 67а и 67b. При опредѣленномъ рабочемъ состояніи періодическія колебанія силы тока представлены средней зигзагообразной линіей, которая составлена изъ отрѣзковъ кривыхъ c_1 и c_2, расположенныхъ на одинаковой высотѣ.

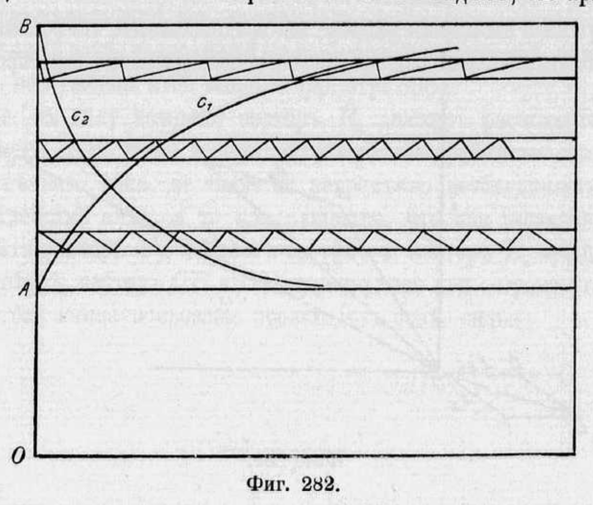
Если, напримѣръ, понижается напряженіе сѣти, то, какъ указывалось выше, сила тока вслѣдствіе болѣе продолжительнаго соприкосновенія кон-

[1]) Ср. Natalis, «Die selbstätige Regulierung der elektrischen Generatoren». Braunschweig, 1908.

тактовъ возрастетъ на нѣкоторую величину, т. е. зигзагообразная линія перемѣстится вверхъ. При возрастаніи напряженія сѣти, наоборотъ, она перемѣстится внизъ. Отдѣльныя части кривыхъ снова соотвѣтствуютъ расположеннымъ на одинаковой высотѣ частямъ кривыхъ c_1 и c_2.

Въ то же время изъ фиг. 282 мы видимъ, что число колебаній контактовъ k при возбужденіи, соотвѣтствующемъ средней зигзагообразной линіи, будетъ наибольшимъ, при болѣе сильномъ и болѣе слабомъ будетъ меньше. Во всякомъ случаѣ число колебаній не имѣетъ никакого непосредственнаго вліянія на степень возбужденія.

Далѣе, изъ нижней зигзагообразной линіи мы видимъ, что при незначи-



Фиг. 282.

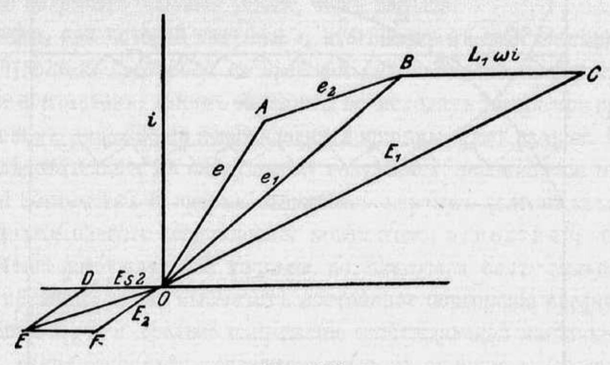
тельномъ возбужденіи время, въ которое токъ возрастаетъ, будетъ меньше времени, въ теченіе котораго токъ убываетъ. При сильномъ возбужденіи, наоборотъ, время возрастанія превосходитъ время ослабленія. Согласно вышеуказаннымъ выводамъ, кажется, какъ будто это явленіе оказывается не причиной, а слѣдствіемъ измѣненія тока въ обмоткѣ электромагнитовъ возбуждающей машины.

Теперь перейдемъ къ разсмотрѣнію способа, при которомъ измѣненіемъ тока, доставляемаго генераторомъ, пользуются для измѣненія возбужденія (компаундированіе). При этомъ способѣ токъ сѣти пропускаютъ черезъ первичную обмотку трансформатора, включеннаго послѣдовательно, а вторичную обмотку этого послѣдняго при посредствѣ щетокъ соединяютъ съ якоремъ возбуждающей машины, заклиненной на одномъ валу съ генераторомъ. Возбуждающая машина является, такимъ образомъ, второю маши-

ною перемѣннаго тока. Независимо отъ коэффиціента трансформаціи трансформаторъ, включенный послѣдовательно, дѣйствуетъ такъ, какъ будто вторая машина была приключена непосредственно послѣдовательно къ главному генератору.

Сдвигъ фазъ между электродвижущими силами обѣихъ машинъ зависитъ при неподвижномъ магнитномъ остовѣ возбуждающей машины отъ того, въ какихъ точкахъ обмотка якоря возбуждающей машины присоединена къ контактнымъ кольцамъ. Если магнитный потокъ возбуждающей машины можно путемъ вращенія переставлять, то сдвигъ фазъ можетъ быть выбранъ произвольнымъ.

Для лучшаго выясненія работы, мы предположимъ, что обѣ машины соединены послѣдовательно одна съ другою непосредственно, безъ промежуточ-



Фиг. 283.

наго включенія трансформатора. Омическою потерею напряженія обѣихъ машинъ можно пренебречь. Векторъ тока въ сѣти совпадаетъ съ осью ординатъ, а векторъ E_1 представляетъ напряженіе при холостомъ ходѣ главной машины. Тогда $OB = e_1$ будетъ напряженіемъ у зажимовъ главной машины и BC индуктивной потерей напряженія у этой машины.

Электродвижущая сила второй машины, создаваемая однимъ только возбужденіемъ электромагнитовъ, выразится по величинѣ и фазѣ векторомъ $E_2 = OF$. Ея фаза преднамѣренно выбрана такимъ образомъ, чтобы векторъ E_2 былъ противоположенъ по направленію вектору тока, и машина будетъ работать, какъ двигатель (ср. ст. 105).

Электродвижущая сила самоиндукціи E_s у второй машины, создаваемая токомъ якоря, отстаетъ отъ тока на 90°. Пусть она изобразится векторомъ OD. Тогда OE будетъ полною электродвижущею силою второй машины.

Отложимъ теперь AB равною и направленною противоположно OE, тогда часть $AB = e_2$ напряженія у зажимовъ OB первой машины будетъ израсходована на преодолѣніе противоположно направленной электродвижущей силы OE. Геометрическая разность OA будетъ тогда напряженіемъ e у зажимовъ сѣти.

Какъ только сила тока въ сѣти увеличится, возрастетъ также и векторъ OD, а отсюда и полная электродвижущая сила OE. Такъ какъ послѣдняя является мѣрою силового потока, пронизывающаго якорь возбуждающей машины, то одновременно возростаетъ и напряженіе у щетокъ возбуждающей машины, т. е. намагничивающій токъ главной машины. Мы можемъ представить себѣ все это явленіе происходящимъ такимъ образомъ, что перемѣнный токъ, подводимый къ возбуждающей машинѣ, какъ бы подкрѣпляетъ возбужденіе этой машины (ср. стр. 398).

Условіе, въ силу котораго векторъ E_2 долженъ располагаться подъ осью ординатъ, т. е. чтобы возбуждающая машина работала, какъ двигатель перемѣннаго тока, не является непремѣнно необходимымъ. Но при такомъ устройствѣ имѣется то преимущество, что при увеличеніи сдвига фазы въ сѣти векторъ E_1, а вмѣстѣ съ тѣмъ и векторъ E_2 вращаются по часовой стрѣлкѣ, вектора OF и OD суммируются при остромъ углѣ между ними, и потому компаундированіе происходитъ болѣе сильно.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ.

104. Принципъ синхронныхъ двигателей.

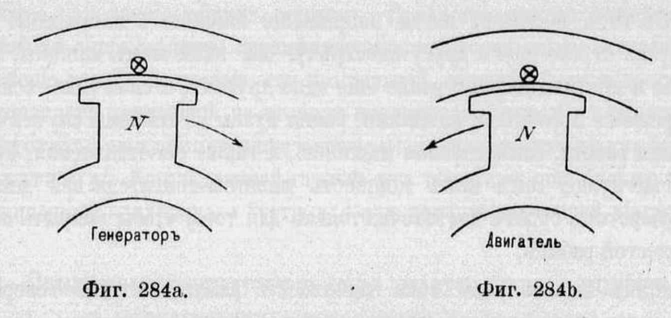
Среди двигателей, приводящихся въ движеніе перемѣннымъ токомъ, различаютъ двигатели синхронные, которые какъ при холостой работѣ, такъ и при нагрузкѣ работаютъ съ однимъ и тѣмъ же числомъ оборотовъ, и асинхронные или индукціонные, число оборотовъ которыхъ съ нагрузкою нѣсколько уменьшается. Къ асинхроннымъ двигателямъ принадлежитъ и обычный трехфазный двигатель.

Синхронные двигатели представляютъ собою не что иное, какъ обращенную машину перемѣннаго тока, и могутъ быть построены для однофазнаго или многофазнаго токовъ. Каждая машина перемѣннаго тока можетъ свободно работать какъ двигатель перемѣннаго тока. Если мы станемъ вращать сѣверный полюсъ изображеннаго на фиг. 284a генератора перемѣннаго тока по часовой стрѣлкѣ, то въ проволокѣ, расположенной передъ сѣвернымъ полюсомъ, будетъ индуктироваться токъ, который, если пренебречь сдвигомъ фазъ, пойдетъ отъ насъ за плоскость чертежа. При этомъ машина-двигатель должна механически преодолѣвать вращающій моментъ, создаваемый взаимодѣйствіемъ тока и магнитнаго поля. Отсюда вытекаетъ, что у изображеннаго на фиг. 284b двигателя электромагнитное воздѣйствіе стремится вращать электромагниты противъ часовой стрѣлки.

Пусть теперь въ слѣдующій моментъ передъ изображенной проволокой находится вмѣсто сѣвернаго южный полюсъ. Тогда токъ долженъ тѣмъ временемъ измѣнить свое направленіе, чтобы новый вращающій моментъ былъ одного направленія съ прежнимъ. Слѣдовательно, число оборотовъ электромагнитовъ должно уже при пускѣ въ ходъ точно совпадать съ числомъ періодовъ сѣти. Если p число паръ полюсовъ двигателя, $n/60$ число его оборотовъ въ секунду и $\sim_1$ число періодовъ сѣти, то должно имѣть мѣсто слѣдующее уравненіе:

$$\frac{n}{60} = \frac{\sim_1}{p}.$$

Слѣдовательно, синхронный двигатель до включенія долженъ механически быть приведенъ къ синхронизму. Если имѣется батарея, то для этой



Фиг. 284a. Фиг. 284b.

цѣли машину постояннаго тока, заклиненную непосредственно на одномъ валу съ двигателемъ и служащую для возбужденія электромагнитовъ, приводятъ въ движеніе, какъ двигатель. Синхронные двигатели, заклиненные на одномъ валу съ генераторомъ постояннаго тока и служащіе для преобразованія перемѣннаго тока въ постоянный, пускаются въ ходъ со стороны постояннаго тока. Необходимость приведенія синхроннаго двигателя до включенія къ синхронизму исключаетъ во многихъ случаяхъ возможность примѣненія его.

Что касается самаго включенія двигателя, работающаго синхронично, то оно производится подобно параллельному включенію машины перемѣннаго тока. Чтобы лучше выяснить это, предположимъ, что еще окончательно не рѣшено, должна ли машина, включаемая въ сѣть, работать какъ генераторъ или какъ двигатель. Когда машина перемѣннаго тока заклинена на одномъ валу съ машиной постояннаго тока, то мы можемъ наше предположеніе воплотить и въ реальную форму. У насъ имѣется возможность приключить машину постояннаго тока къ аккумуляторной батареѣ и

безъ большихъ измѣненій въ схемѣ заставлять машину постояннаго тока работать то какъ генераторъ, то какъ двигатель. Если мы возбудимъ машину постояннаго тока столь сильно, что ея электродвижущая сила превыситъ электродвижую силу аккумуляторной батереи, то батарея начнетъ заряжаться, и машина постояннаго тока будетъ работать, какъ генераторъ. Наоборотъ, если мы возбудимъ машину слабѣе, то превыситъ электродвижущая сила батареи и будетъ приводить въ движеніе машину постояннаго тока, какъ двигатель.

Слѣдовательно, включенную параллельно машину перемѣннаго тока мы приводимъ, какъ было уже указано въ ст. 100, при помощи машины постояннаго тока, работающей какъ двигатель, къ надлежащему числу оборотовъ. Затѣмъ измѣняемъ ея намагничивающій токъ до тѣхъ поръ, пока электродвижущая сила машины не станетъ равною напряженію въ сѣти. Въ тотъ моментъ, когда напряженіе машины и напряженіе сѣти дѣйствуетъ строго другъ другу навстрѣчу, мы включаемъ машины. Тогда давленіе и противодавленіе равно еще одно другому, а сила тока, если мы пренебрежемъ побочными вліяніями, равна нулю. Во всякомъ случаѣ электрическая работа, заимствуемая машиною, а также ею отдаваемая, будетъ равна еще нулю, такъ какъ мощность машины-двигателя при данномъ числѣ оборотовъ будетъ достаточна только для того, чтобы покрыть потери при холостой работѣ.

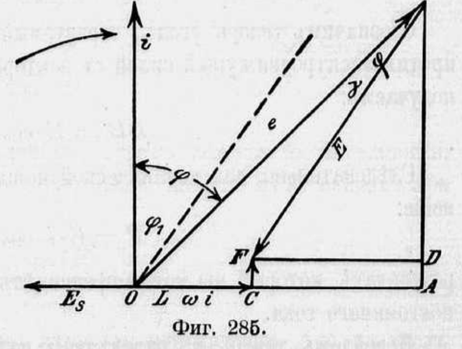
Машина перемѣннаго тока начинаетъ работать какъ генераторъ только тогда, когда мы увеличимъ прилагаемую къ ней энергію. Для этой цѣли мы ослабляемъ магнитное поле непосредственно заклиненной съ нею машины постояннаго тока, которая работаетъ теперь какъ двигатель и питается батареей.

Обыкновенно такое ослабленіе намагничивающаго тока при шунтовомъ двигателѣ вызываетъ повышеніе числа оборотовъ. Но въ этомъ случаѣ число оборотовъ нашей двойной машины строго удерживается числомъ періодовъ въ сѣти перемѣннаго тока. При этомъ постоянномъ числѣ оборотовъ ослабленіе поля у двигателя постояннаго тока вызываетъ уменьшеніе электродвижущей силы этого послѣдняго. Тогда, согласно уравненію $i_a = \frac{e - E}{w_a}$, возрастаетъ сила тока и якорь ускоряется. Якорь машины перемѣннаго тока вслѣдствіе этого займетъ такое положеніе передъ полюсами, что, согласно ст. 98, создаваемая при этомъ электрическая мощность перемѣннаго тока увеличится. Эта послѣдняя будетъ уравновѣшивать увеличившуюся механическую энергію на сторонѣ постояннаго тока. Слѣдовательно, благодаря опереженію, вызываемому механическимъ путемъ, машина перемѣннаго тока становится генераторомъ.

Оставимъ, теперь, все безъ измѣненія, только вмѣсто ослабленія, наоборотъ, усилимъ намагничивающій токъ. При постоянномъ, устанавливаемомъ со стороны перемѣннаго тока числѣ оборотовъ, усиленіе поля машины постояннаго тока вызываетъ увеличеніе ея электродвижущей силы. Эта послѣдняя вслѣдствіе этого станетъ больше напряженія у зажимовъ или электродвижущей силы батареи, и машина будетъ посылать токъ въ батарею и заряжать ее. Такимъ образомъ, машина постояннаго тока становится генераторомъ, а машина перемѣннаго тока начинаетъ работать какъ двигатель. Во время этого процесса энергія, сообщаемая батареей машинѣ, сначала положительна, затѣмъ равняется нулю и, наконецъ, становится отрицательною; при этомъ должно неминуемо наступить механическое замедленіе обѣихъ машинъ. Вслѣдствіе такого замедленія или отставанія якорь машины перемѣннаго тока займетъ такое относительное положеніе передъ полюсами, что вращающій моментъ будетъ достаточенъ для мощности, потребной на сторонѣ постояннаго тока. Слѣдовательно, вслѣдствіе замедленія или отставанія генераторъ превращается въ двигатель. Въ слѣдующей статьѣ мы пояснимъ еще больше всѣ эти соотношенія у синхроннаго двигателя при помощи векторной діаграммы.

105. Синхронный двигатель при постоянномъ возбужденіи и постоянномъ напряженіи у зажимовъ.

Діаграмма векторовъ для двигателя перемѣннаго тока (фиг. 285) совершенно схожа съ діаграммою для машинъ перемѣннаго тока. Мы должны обратить вниманіе только на то, что электродвижущая сила E двигателя направлена прямо противоположно силѣ тока и напряженію e у зажимовъ сѣти.



Фиг. 285.

Пусть токъ отстаетъ на уголъ φ отъ напряженія у зажимовъ $e = OB$; векторъ его совпадаетъ съ осью ординатъ. Электродвижущая сила самоиндукціи E_s, возникающей вслѣдствіе реакціи и разсѣянія якоря, отстаетъ на 90° отъ тока, т. е. векторъ ея пойдетъ по оси

абсциссъ влѣво. Векторъ $OC = L\omega \cdot i$, противоположенъ ей по направленію и представляетъ индуктивную потерю напраженія; векторъ CF, идущій параллельно вектору тока, показываетъ омическую потерю. Тогда векторъ FB соотвѣтствуетъ той части напряженія, которая идетъ на преодолѣніе противоэлектродвижущей силы. Обратно векторъ $BF = E$ будетъ изображать самое противоэлектродвижущую силу. Мы находимъ и здѣсь подтвержденіе правила Кирхгофа, по которому сумма электродвижущихъ силъ, въ нашемъ случаѣ e и E, даетъ равнодѣйствующую OF, равную суммѣ потерь напряженія OC и CF.

Проведемъ теперь черезъ точку O пунктирную линію, параллельно BF. Ясно, что векторъ $E = BF$ при включеніи, слѣдовательно, при холостомъ ходѣ, совпадалъ съ векторомъ e, но теперь механическая нагрузка заставила его отстать отъ вектора, изображающаго напряженіе у зажимовъ, на уголъ γ. (Ср. конецъ предыдущей статьи).

Мощность, сообщаемая двигателю, равняется:

$$P_1 = e \cdot i \cdot \cos\varphi,$$

гдѣ φ будетъ уголъ между векторами напряженія у зажимовъ и силы тока. Подставимъ затѣмъ вмѣсто $e \cdot \cos\varphi$ отрѣзокъ AB, тогда получимъ:

$$P_1 = i \cdot AB.$$

Часть этой энергіи, перешедшая въ тепло Джоуля, будетъ.

$$i^2 \cdot w_a = i \cdot i \cdot w_a = i \cdot AD.$$

Согласно этому, механическая мощность P двигателя выразится такимъ образомъ:

$$P = P_1 - i^2 \cdot w_a = i\,(AB - AD) = i \cdot DB.$$

Обозначимъ теперь уголъ, образуемый противоположно направленной противоэлектродвижущей силой съ векторомъ силы тока, черезъ φ_1, тогда получаемъ:

$$DB = E \cdot \cos\varphi_1.$$

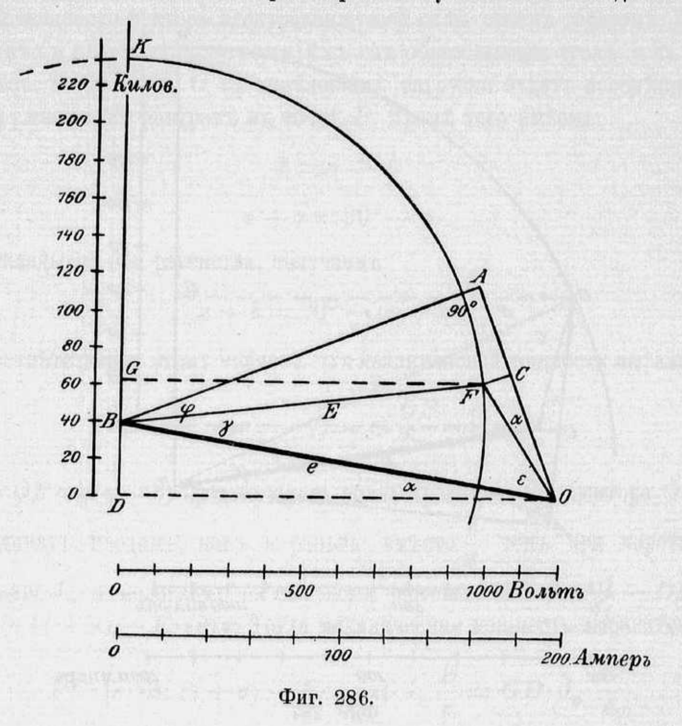
Слѣдовательно, для механической мощности двигателя получаемъ уравненіе:

$$P = E \cdot i \cdot \cos\varphi_1$$

результатъ, который мы могли предвидѣть изъ законовъ, выведенныхъ для постояннаго тока.

Перейдемъ, теперь, къ опредѣленію полной мощности, сообщаемой двигателю, и механической мощности въ зависимости ихъ отъ сдвига фазъ между напряженіемъ у зажимовъ и противоэлектродвижущей силой.

Для опредѣленія полной мощности мы предположимъ, что векторъ OB на фиг. 286, изображающій напряженіе у зажимовъ, при всѣхъ рабочихъ состояніяхъ занимаетъ одно и то же положеніе и образуетъ съ осью абсциссъ уголъ α; этотъ уголъ опредѣляется уравненіемъ $tg\,\alpha = \frac{w_a}{L\omega}$. Пусть векторъ FB, служащій для преодолѣнія противоэлектродвижущей силы E, отстаетъ на уголъ γ отъ вектора напряженія у зажимовъ. Тогда точка F



Фиг. 286.

при различныхъ рабочихъ состояніяхъ будетъ лежать на окружности, центръ которой въ B. Подобно тому, какъ на фиг. 272, найдемъ при $z = \sqrt{w_a^2 + (L\omega)^2}$, что

$$i = \frac{OF}{z}.$$

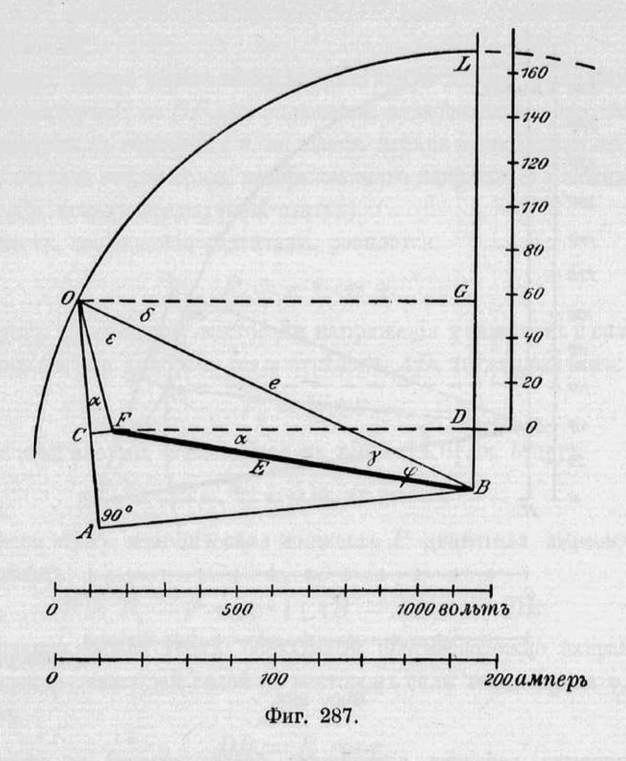
Далѣе, такъ какъ векторъ тока идетъ по направленію AB, то уголъ между напряженіемъ и токомъ выразится:

$$\varphi = 90^\circ - (\varepsilon + \alpha).$$

Поэтому сообщаемая электрическая мощность будетъ

$$P_1 = e \cdot i \cdot cos\varphi = \frac{e \cdot OF}{z} \cdot sin\,(\varepsilon + \alpha).$$

Но $OF \cdot sin(\varepsilon + \alpha)$ будетъ проэкціей DG вектора OF на ось ординатъ. Введемъ опять токъ при короткомъ замыканіи J_0, который теперь



Фиг. 287.

для двигателя выразится черезъ $\frac{e}{z}$; на основаніи чертежа имѣемъ: $OF \cdot sin(\varepsilon + \alpha) = DB + BG = e \cdot sin\alpha + E \cdot sin(\gamma - \alpha)$. Тогда доставляемая электрическая мощность выразится формулой:

$$P_1 = J_0\,\{e \cdot sin\alpha + E \cdot sin\,(\gamma - \alpha)\} = J_0 \cdot DG \quad . \; . \; . \; (66)$$

Чертежъ сдѣланъ для значеній

$$e = 1\,200, \qquad E = 1\,000, \qquad w_a = 1, \qquad L\omega = 6.$$

J_0 получается равнымъ 197. Измѣняя соотвѣтственно масштабъ, мы сможемъ отсчитывать сообщаемыя мощности непосредственно по оси ординатъ.

Изъ чертежа ясно, что съ возрастаніемъ угла γ возрастаетъ и полная мощность, которая при $\gamma = 90° + \alpha$ достигаетъ своего наибольшаго значенія.

Ради упрощенія отложимъ также на черт. 287 для опредѣленія механической мощности векторъ электродвижущей силы такимъ образомъ, чтобы при всѣхъ рабочихъ состояніяхъ онъ образовывалъ уголъ α съ осью абсциссъ. Тогда точка O съ измѣненіемъ нагрузки будетъ перемѣщаться по окружности съ центромъ въ точкѣ B. Кромѣ того имѣемъ:

$$\delta = \gamma + \alpha$$

$$\varepsilon + \alpha = 90° - \varphi$$

или, складывая эти равенства, получаемъ:

$$\varepsilon + \delta = 90° - (\varphi - \gamma).$$

Соотвѣтственно этому найдемъ для механической мощности выраженіе:

$$P = E \cdot i \cdot cos(\varphi - \gamma) = E \cdot \frac{OF}{z} \cdot sin(\varepsilon + \delta).$$

Но $OF \cdot sin(\varepsilon + \delta)$ представляетъ опять проэкцію GD вектора OF на ось ординатъ. Вводимъ, какъ и раньше, вмѣсто $\frac{e}{z}$ токъ при короткомъ замыканіи J_0 и полагаемъ на основаніи чертежа $GD = GB - DB = e \cdot sin\,(\gamma + \alpha) - E \cdot sin\alpha$. Тогда механическая мощность выразится:

$$P = [e \cdot sin\,(\gamma + \alpha) - E \cdot sin\alpha] \cdot J_0\,\frac{E}{e} = GD \cdot J_0 \cdot \frac{E}{e} \quad . \; . \; (67)$$

Выбравъ соотвѣтствующій масштабъ, мы сможемъ отсчитывать механическую мощность непосредственно по оси ординатъ.

Чѣмъ больше мы будемъ нагружать двигатель, тѣмъ болѣе будетъ точка O передвигаться вверхъ *) при одновременномъ увеличеніи угла γ.

Чертежъ вычерченъ, какъ и раньше, для значеній $w_a = 1$, $L\omega = 6$, $e = 1\,200$ и $E = 1\,000$. Какъ видимъ, механическая мощность будетъ имѣть наибольшее значеніе при $\gamma = 90° - \alpha$. Если же мы двигатель нагрузимъ еще больше, то произойдетъ дальнѣйшее замедленіе, и уголъ γ

*) Это равносильно перемѣщенію вектора E внизъ.

станетъ еще больше. Наоборотъ, мощность, развиваемая двигателемъ, согласно нашей діаграммѣ, уменьшится. Двигатель тогда не въ состояніи будетъ тащить нагрузку, выпадетъ изъ синхронизма и остановится. Такъ какъ это равносильно короткому замыканію, то нормальная работа двигателя должна происходить при небольшомъ углѣ γ. Если нормальный вращающій моментъ получается приблизительно при $\gamma = 30°$, то можно допускать перегрузку, равную двойному нормальному вращающему моменту.

Что касается способности къ перегрузкѣ, то раціонально имѣть на основаніи ур. (67) большую противоэлекродвижущую силу и большой токъ при короткомъ замыканіи, т. е. выгоднѣе является небольшая самоиндукція.

Все, что было сказано о синхронизирующей силѣ якоря генератора и о колебаніи этихъ послѣднихъ, относится и къ двигателямъ. Намъ остается только разсмотрѣть работу двигателя, нагрузка котораго остается неизмѣнною, а возбужденіе мѣняется.

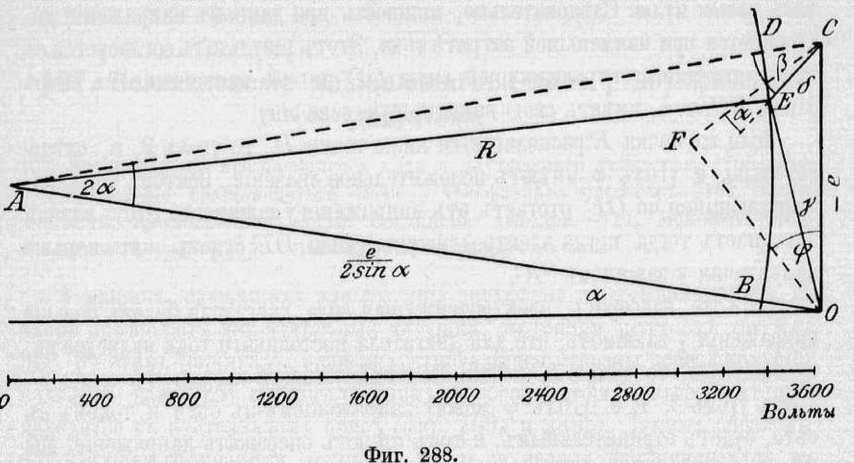
106. Синхронный двигатель при постоянной нагрузкѣ и перемѣнномъ возбужденіи.

Разсмотримъ постоянно нагруженный двигатель, включенный въ сѣть съ постояннымъ напряженіемъ. Спрашивается, теперь, какое вліяніе окажетъ измѣненіе возбужденія на силу тока и на сдвигъ фазъ? Для этой цѣли умножимъ уравненіе (67), на стр. 445, на $\dfrac{e}{J_0 \cdot sin\alpha}$ и прибавимъ къ лѣвой и правой части $\left(\dfrac{e}{2 \cdot sin\alpha}\right)^2$. Въ то же время подставимъ $sin\alpha\,(\alpha + \gamma) = cos\,[90° - (\alpha + \gamma)]$, тогда получимъ:

$$E^2 + \left(\frac{e}{2 \cdot sin\alpha}\right)^2 - \frac{E \cdot e}{sin\alpha} \cdot cos\,[90° - (\alpha + \gamma)] = \left(\frac{e}{2 \cdot sin\alpha}\right)^2 - \frac{P \cdot e}{J_0 \cdot sin\alpha} \quad (a)$$

Принимая снова во вниманіе, что $\dfrac{e}{J_0}$ у двигателя постоянно равно полному кажущемуся сопротивленію, мы можемъ правую часть приравнять постоянной величинѣ R^2. Тогда изъ уравненія (67) мы видимъ, что долженъ существовать треугольникъ со сторонами E, $\dfrac{e}{2 \cdot sin\alpha}$ и R, и уголъ между двумя первыми долженъ составлять $90° - (\alpha + \gamma)$. Проводимъ тогда на фиг. 288 векторъ OA такимъ образомъ, чтобы длина его была равной $\dfrac{e}{2 \cdot sin\alpha}$ и чтобы съ горизонтальною прямою онъ составлялъ уголъ α. Затѣмъ

изъ A проводимъ радіусомъ R окружность. Векторъ OE этой окружности представляетъ тогда противоэлектродвижущую силу, векторъ же OC напряженія у зажимовъ, взятаго съ отрицательнымъ знакомъ, совпадаетъ съ направленіемъ оси ординатъ. Діаграмма вычерчена въ томъ предположеніи, что $w_a = 1$, $L\omega = 6$ и $e = 1200$ и постоянная нагрузка $P = 50\,000$ ваттъ. Чѣмъ слабѣе будетъ возбуждаться двигатель, тѣмъ ниже будетъ опускаться точка E, тѣмъ больше будетъ уголъ γ. Но вслѣдствіе этого двигатель приближается къ опасному состоянію, опредѣляемому электродвижущей силой OB. Это возбужденіе наименьшее, при которомъ двигатель доставляетъ механическую энергію въ 50 000 ваттъ, или, какъ мы выражались въ одной изъ предыдущихъ статей: мощность въ 50 000 ваттъ



Фиг. 288.

является наибольшею, которую двигатель при электродвижущей силѣ OB превращаетъ въ механическую энергію.

Опредѣлимъ, теперь, снова на фиг. 288 уголъ сдвига фазъ между напряженіемъ у зажимовъ и силою тока. Для этого проведемъ прямую AC которая пересѣчетъ окружность въ точкѣ D. Затѣмъ проведемъ CF такимъ образомъ, чтобы она составляла съ CE уголъ α, и проведемъ далѣе OF перпендикулярно къ CF. Тогда въ треугольникѣ OFC нашей діаграммы мы узнаемъ безъ всякаго труда треугольникъ BAO фиг. 285. Согласно этому уголъ COF равенъ углу сдвига фазъ φ между напряженіемъ у зажимовъ и силою тока.

Но мы видѣли, что

$$OA = \frac{e/2}{sin\,\alpha}\,.$$

Слѣдовательно, точка A находится на разстояніи $e/2$ надъ осью абсциссъ. Вслѣдствіе этого треугольникъ OAC равнобедренный и уголъ OAC равенъ 2α. Тогда въ треугольникѣ OAC имѣемъ:

$$180^\circ = 2\alpha + \beta + \delta + 90^\circ - \alpha.$$

Далѣе

$$\varphi = 90^\circ - (\alpha + \delta).$$

Складывая оба эти уравненія, получаемъ:

$$\varphi = \beta.$$

Когда точка E совпадаетъ съ точкою D, уголъ β, а потому и сдвигъ фазъ равны нулю. Слѣдовательно, мощность при данномъ напряженіи доставляется при наименьшей затратѣ тока. Этотъ результатъ согласуется съ тѣмъ, что для электродвижущей силы OD потеря напряженія въ якорѣ равна DC, т. е. имѣетъ свою наименьшую величину.

Если же точка E располагается ниже точки D, то уголъ β, а, слѣдовательно, и уголъ φ имѣютъ положительное значеніе. Векторъ тока, направляющійся по OF, отстаетъ отъ напряженія у зажимовъ. Этотъ случай наступаетъ тогда, когда электродвижущая сила OE будетъ опять меньше напряженія у зажимовъ OC.

Если же, наоборотъ, электродвижущая сила двигателя будетъ больше напряженія у зажимовъ, что для двигателя постояннаго тока является несуразностью, то точка E пошла бы по окружности вверхъ отъ точки D. Тогда уголъ β, т. е. уголъ φ между напряженіемъ въ сѣти и токомъ въ сѣти, будетъ отрицательнымъ, и токъ станетъ опережать напряженіе. Мы уже раньше видѣли, что такіе отрицательные сдвиги фазъ, создаваемые при посредствѣ перевозбужденныхъ двигателей, съ успѣхомъ могутъ примѣняться для того, чтобы выравнять положительные сдвиги фазъ другихъ аппаратовъ, такимъ образомъ токъ въ сѣти будетъ чисто ваттнымъ токомъ.

ШЕСТНАДЦАТАЯ ГЛАВА[1]).

107. Возникновеніе вращающагося поля у двухфазнаго двигателя.

У машинъ, служащихъ для созданія двухфазнаго перемѣннаго тока, на якорѣ помѣщаютъ двѣ отдѣльныя катушки, отстоящія другъ отъ друга на 90°. Въ этихъ машинахъ, если индуктирующіяся стороны первой катушки находятся какъ разъ противъ серединъ полюсовъ, стороны второй катушки находятся въ нейтральномъ поясѣ (фиг. 289a и 289b). Такимъ образомъ, обѣ катушки отличаются другъ отъ друга по своему измѣняющемуся въ зависимости отъ времени состоянію, т. е. по фазѣ. Поэтому обѣ катушки называютъ просто обѣими фазами генератора.

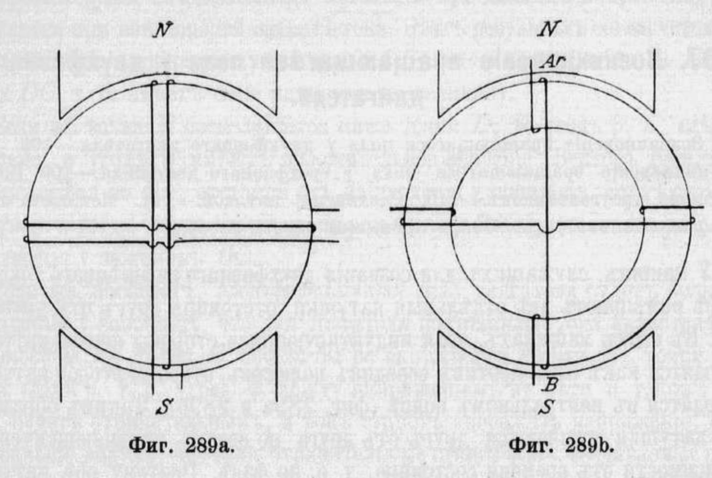
Устроенная на этомъ принципѣ барабанная обмотка на фиг. 289a вполнѣ понятна. Кольцевая же двухфазная обмотка (фиг. 289b) дѣлается такимъ образомъ, что торцевыя соединенія ея располагаются, подобно барабанной обмоткѣ, поперекъ передней торцевой поверхности. При такомъ способѣ соединеній каждая изъ двухъ соотвѣтствующихъ катушекъ наматывается,

---

[1]) О двигателяхъ трехфазнаго тока см. Kapp: «Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom», а также Behrend: «The induction Motor», или нѣмецкую обработку: «Induktionsmotoren von Behrend», подъ редакціей проф. Kübler перевелъ Dr. P. Berkitz. Затѣмъ очень цѣнныя письма и статьи относительно діаграммъ трехфазнаго двигателя въ ETZ за 1894 г. Наконецъ Heubach «Der Drehstrommotor». Berlin, 1903.

конечно, не въ одинаковомъ направленіи. Но при этомъ наиболѣе ясно выступаетъ тождественность кольцевой обмотки съ барабанной. Проволоки, расположенныя на боковой поверхности при A и B, соотвѣтствуютъ тогда индуктирующимся сторонамъ одного витка барабанной обмотки. Легко видѣть, что электродвижущія силы обѣихъ частей одной фазы складываются.

Но все значительно упрощается, когда мы изобразимъ якорь генератора подвижнымъ, а индуктируемую обмотку неподвижной (сравни фиг. 290а слѣва). Тогда проводникъ въ каналѣ 1 проводится отъ задней поверхности къ лицевой, затѣмъ идетъ по передней поверхности къ 1′ и образуетъ такимъ способомъ витокъ 1—1′. Конецъ витка 1—1′ находится сзади у 1′. Другой витокъ ведется такимъ же способомъ *).



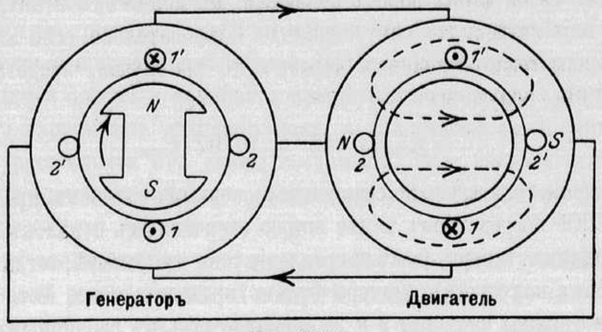
Фиг. 289a. Фиг. 289b.

Токъ, создаваемый генераторомъ, идетъ на то, чтобы намагнитить неподвижно закрѣпленное желѣзное кольцо двигателя перемѣннаго тока. Это желѣзное кольцо, такъ называемый статоръ, дѣлается изъ листового желѣза и обматывается совершенно такъ же, какъ якорь генератора. Концы фазовой обмотки статора соединяются съ соотвѣтствующими концами обмотки генератора.

Если якорь генератора будетъ вращаться по часовой стрѣлкѣ, то токъ въ проволокахъ на передней торцевой поверхности направляется къ сѣвер-

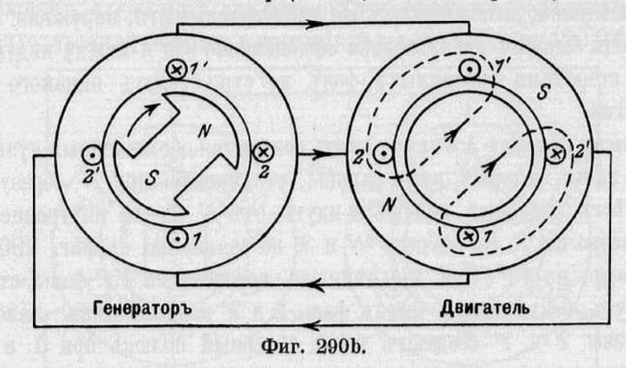
*) Этотъ способъ изображенія не даетъ, конечно, возможности вычертить лицевыя соединенія, но имѣетъ то преимущество, что наглядно и удобно показываетъ распредѣленіе тока въ проводникахъ, располагающихся по боковой поверхности.

ному полюсу и отъ южнаго полюса. Если мы не примемъ во вниманіе сдвигъ фазъ вслѣдствіе самоиндукціи, то токъ въ катушкѣ, находящейся передъ серединой полюса, будетъ имѣть свое наибольшее значеніе, въ то время какъ въ другой онъ будетъ равенъ нулю. Токъ идетъ въ генераторѣ у 1′ отъ передней поверхности къ задней, затѣмъ у двигателя въ 1′ отъ



Фиг. 290a.

задней поверхности къ передней, далѣе по передней лицевой поверхности къ 1, отсюда отъ передней къ задней поверхности, проходитъ затѣмъ витокъ 1—1′ и возвращается въ 1 генератора. Прослѣдимъ, теперь, направленіе тока въ обмоткѣ статора, тогда, согласно правилу Ампера, по-



Фиг. 290b.

лучимъ силовыя линіи, обозначенныя пунктиромъ. Эти послѣднія въ N сталкиваются и идутъ чрезъ внутреннее полое пространство статора или чрезъ желѣзный цилиндръ, помѣщаемый внутри отъ N къ S. Такимъ образомъ, силовыя линіи образуютъ у N сѣверный, а у S южный полюсъ.

Мы представимъ еще положеніе генератора при поворотѣ его на 45°, въ то время, какъ статоръ будетъ неизмѣнно оставаться въ своемъ преж-

немъ положенiи (фиг. 290b). Теперь уже обѣ фазы генератора располагаются передъ полюсами; разставимъ соотвѣтствующiя стрѣлки на обѣихъ фазахъ. Напряженiе поля на концахъ полюсовъ генератора вслѣдствiе закругленiя кромокъ этихъ послѣднихъ будетъ слабѣе, чѣмъ въ серединѣ, въ то же время индуктирующiяся стороны катушекъ не располагаются уже по всей своей длинѣ передъ полюсами. Мы можемъ, поэтому, принять, что сила тока измѣняется синусоидально. Слѣдовательно, если мгновенное значенiе силы тока обозначимъ черезъ i, то для случая, представленнаго на фиг. 290b, получаемъ:

$$i = i_{max} \cdot sin 45^\circ = 0{,}707 \cdot i_{max}.$$

Ослабленiе тока здѣсь по сравненiю съ первымъ случаемъ, представтено на фиг. 290b посредствомъ менѣе жирно очерченныхъ стрѣлокъ.

Прослѣдимъ, теперь, опять направленiе тока въ статорѣ, тогда увидимъ, что по всѣмъ катушкамъ статора будетъ проходить токъ. Хотя индуктирующiяся стороны катушки 1 и 2′ принадлежатъ къ различнымъ фазамъ, но для насъ онѣ образуютъ какъ бы одну катушку съ двойнымъ числомъ витковъ. Токъ въ обѣихъ индуктирующихся сторонахъ имѣетъ одно и то же направленiе, т. е. идетъ отъ передней поверхности къ задней. Точно также и индуктирующiяся стороны 2 и 1′ двигателя по своему магнитному дѣйствiю представляютъ какъ бы одну катушку. Это справедливо потому, что у двигателей, выполненныхъ въ дѣйствительности, наружная боковая поверхность бываетъ использована обыкновенно вся и между индуктирующимися сторонами различныхъ фазъ не существуетъ никакого пустого промежутка.

Согласно правилу Ампера, опять создаются обозначенныя пунктиромъ силовыя линiи, которыя, какъ раньше, сталкиваясь при N, образуютъ въ этомъ мѣстѣ сѣверный полюсъ и идутъ отъ N черезъ внутреннее полое пространство къ S. Но полюса N и S, по сравненiю съ фиг. 290a, смѣщены теперь на 45°. При дальнѣйшемъ поворотѣ на 45° фазы статора 1 и 1′ будутъ безъ тока, а черезъ фазы 2 и 2′ пойдетъ токъ наибольшей силы. Фазы 2 и 2′ создаютъ тогда сѣверный полюсъ при 1 и южный при 1′.

Мы приходимъ, слѣдовательно, къ поразительному выводу, что вслѣдствiе вращенiя генератора въ двигателѣ создается вращающееся поле или въ неподвижно закрѣпленномъ желѣзѣ статора перемѣщаются магнитные полюсы. Мы можемъ тогда многофазную неподвижную обмотку статора мысленно замѣнить вращающеюся системою полюсовъ, полюсы которой направлены во внутрь и силовыя линiи которой при ея вращенiи

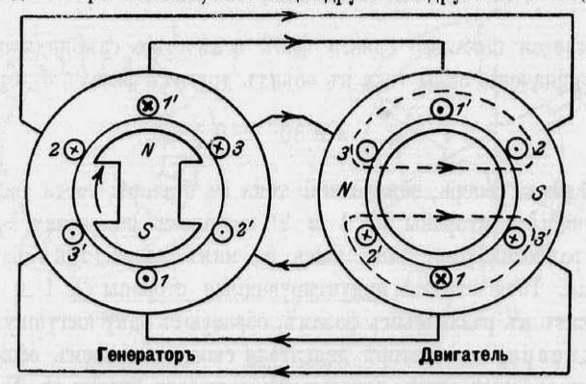
проходятъ сквозь желѣзный цилиндръ, помѣщенный во внутреннемъ поломъ пространствѣ и имѣющiй возможность вращаться (ср. фиг. 308).

Этотъ желѣзный цилиндръ, такъ называемый роторъ, составляется также изъ листового желѣза и имѣетъ замкнутую на себя мѣдную обмотку, расположенную въ каналахъ вдоль боковой поверхности цилиндра. Въ этой послѣдней вращающимся полемъ создаются токи, которые, согласно закону Ленца, стараются помѣшать относительному смѣщенiю между силовымъ полемъ и проводниками ротора. Вслѣдствiе этого роторъ увлекается вращающимся полемъ и начинаетъ вращаться въ сторону вращенiя поля. При этомъ направленiе вращенiя поля, а слѣдовательно, и ротора находится въ зависимости отъ схемы соединенiя. Если переключить провода тока одной какой-либо фазы, то благодаря этому измѣнится направленiе вращенiя.

Если q' число витковъ индуктирующейся стороны катушки, то индукцiя въ первый разсматриваемый моментъ времени равна $q' \cdot i_{max}$, во второй же моментъ $2q' \cdot i_{max}\, sin\, 45^\circ = 1{,}4 q' \cdot i_{max}$. Колебанiя, слѣдовательно, довольно значительны.

108. Возникновенiе вращающагося поля у трехфазнаго двигателя.

У машинъ, служащихъ для созданiя трехфазнаго перемѣннаго тока, на якорѣ находятся три обмотки, отстоящiя другъ отъ друга на 120° (фиг. 291).

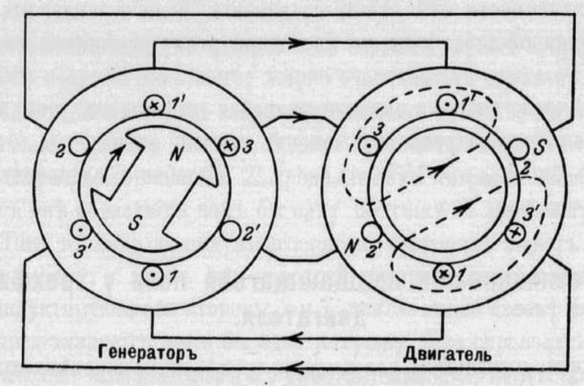


Фиг. 291. Дiаметральная обмотка.

При вычерчиванiи обмотки необходимо обратить вниманiе на то, что начала 1, 2 и 3 трехъ фазъ отстоятъ одно отъ другого на 120° и что вездѣ обмотка у началъ идетъ въ одномъ направленiи. На фиг. 291, напримѣръ,

всѣ провода, подходящіе извнѣ, идутъ въ каналахъ 1, 2 и 3 къ задней торцевой поверхности генератора. Каждая пара каналовъ 1 и 1′, 2 и 2′, 3 и 3′ образуетъ двѣ соотвѣтствующія индуктирующіяся стороны одной фазы. Концы фазъ генератора соединяются посредствомъ контактныхъ колецъ съ соотвѣтствующими зажимами фазъ статора. При этомъ несущественно, что нумерація началъ у генератора идетъ по часовой стрѣлкѣ, а у статора—противъ часовой стрѣлки. Этимъ путемъ при вычерчиваніи избѣгаютъ многихъ скрещиваній.

Фаза 1—1′ генератора находится на фиг. 291 какъ разъ передъ серединами полюсовъ и проводитъ токъ наибольшей силы, если предположить,



Фиг. 292. Діаметральная обмотка.

что не имѣется никакого сдвига фазъ вслѣдствіе самоиндукціи. Тогда мгновенное значеніе силы тока въ обѣихъ другихъ фазахъ будетъ:

$$i = i_{max} \cdot sin\ 30° = 0{,}5\ i_{max}.$$

Прослѣдимъ, теперь, направленіе тока въ статорѣ; тогда увидимъ, что индуктирующіяся стороны 3′, 1 и 2′ катушекъ по своему магнитному дѣйствію равнозначущи, такъ какъ по нимъ идетъ токъ одинаковаго направленія. Точно также индуктирующіяся стороны 2, 1′ и 3, хотя и принадлежатъ къ различнымъ фазамъ, образуютъ одну катушку. Согласно правилу Ампера, въ статорѣ двигателя снова получаемъ обозначенныя пунктиромъ силовыя линіи, и положеніе полюсовъ будетъ въ N и S.

Вычертимъ, теперь, генераторъ послѣ поворота его на 30° (фиг. 292). Въ этотъ моментъ фаза 2—2′ генератора находится въ нейтральномъ поясѣ, слѣдовательно, безъ тока. Мгновенныя же значенія силы тока въ двухъ остальныхъ фазахъ будутъ:

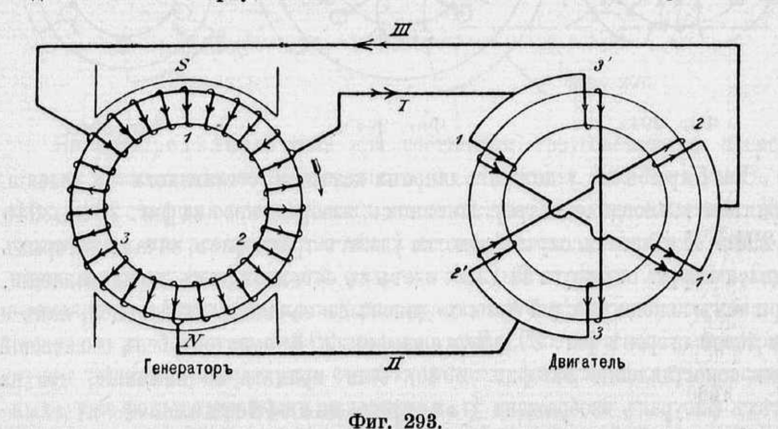
$$i = i_{max} \cdot sin 60° = 0{,}866\ i_{max}.$$

У двигателя индуктирующіяся стороны 1 и 3′ и съ другой стороны индуктирующіяся стороны 3 и 1′ общи по своему магнитному дѣйствію. Создаваемыя силовыя линіи, изображенныя опять пунктирными линіями, сталкиваются при N и образуютъ въ этомъ мѣстѣ сѣверный полюсъ. Такъ какъ положеніе полюсовъ смѣщено по сравненію съ фиг. 291 на 30°, то въ результатѣ получаемъ, что вслѣдствіе вращенія генератора въ двигателѣ создается вращающееся поле. При вычерченной двухполюсной обмоткѣ статора поле за одинъ періодъ дѣлаетъ полный оборотъ.

Если мы вообразимъ, теперь, вмѣсто трехфазной многофазную обмотку, то въ неподвижной обмоткѣ двигателя наибольшее значеніе тока будетъ смѣщаться въ теченіе одного періода совершенно равномѣрно; такимъ образомъ въ данномъ случаѣ мы имѣемъ дѣло не только съ двигателемъ, у котораго вращается поле, но и съ двигателемъ, у котораго какъ бы вращается токъ (Drehstrom), слѣдовательно, съ двигателемъ трехфазнаго тока.

109. Соединеніе треугольникомъ.

Изображенные на фиг. 291 и 292 шесть проводниковъ тока можно, соединеніемъ ихъ треугольникомъ или звѣздою, свести на три. Оба эти



Фиг. 293.

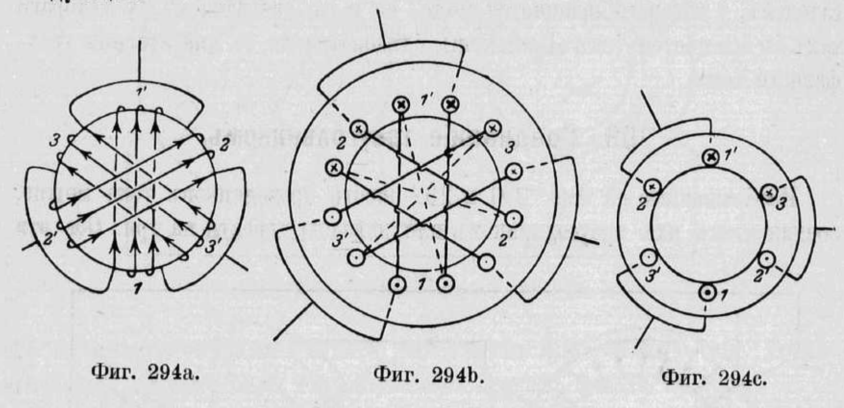
способа соединенія одинаково примѣнимы для генераторовъ и двигателей.

При соединеніи треугольникомъ конецъ одной фазы соединяется съ началомъ слѣдующей. Принципъ такого соединенія наиболѣе очевид-

нымъ будетъ у машинъ, построенныхъ одновременно для постояннаго и перемѣннаго токовъ. Трехфазный токъ въ этомъ случаѣ снимается съ машины при помощи контактныхъ колецъ въ трехъ точкахъ, отстоящихъ другъ отъ друга на 120° (см. лѣвую половину фиг. 293). Ширина индуктирующейся стороны катушки составляетъ тогда $^2/_3$ полюснаго дѣленія.

Подобнаго рода соединеніе трехъ фазъ треугольникомъ устраиваютъ также у барабанной обмотки постояннаго тока, которую примѣняютъ для созданія трехфазнаго тока. И здѣсь ширина катушки составляетъ $^2/_3$ полюснаго дѣленія.

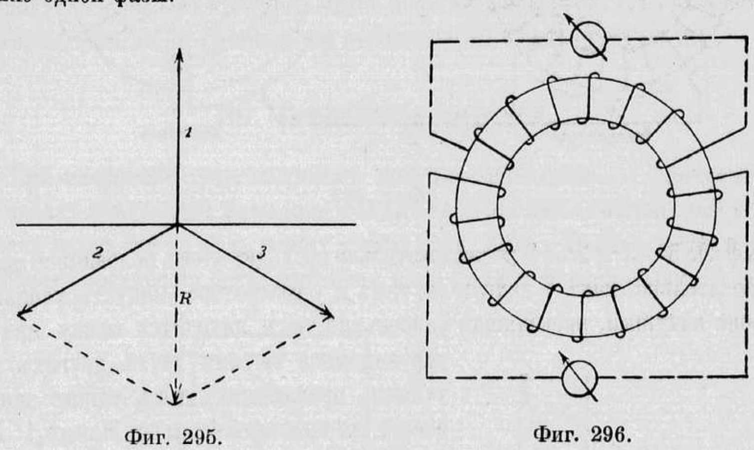
Для кольца двигателя, у котораго ширина катушки составляетъ $^1/_3$ полюснаго дѣленія, устраиваютъ соединеніе, изображенное на правой сторонѣ фиг. 293. Начала каждой изъ трехъ фазъ наматываютъ въ одномъ направленіи, при чемъ конецъ одной фазы соединяется съ началомъ слѣдующей.



Фиг. 294a. Фиг. 294b. Фиг. 294c.

Для барабана, у котораго ширина катушки составляетъ $^1/_3$ дѣленія, примѣняется соединеніе треугольникомъ, изображенное на фиг. 294a, 294b и 294c. И въ этомъ случаѣ обмотка у всѣхъ трехъ фазъ, начала которыхъ удалены другъ отъ друга на 120°, идетъ въ одномъ и томъ же направленіи, при чемъ конецъ каждой фазы соединенъ съ началомъ слѣдующей, какъ и на лѣвой сторонѣ фиг. 293. Чертежъ фиг. 294c понятенъ безъ объясненій при сопоставленіи съ фиг. 294b, если принять во вниманіе, что на всѣхъ фигурахъ изображена діаметральная обмотка.

Что соединеніе треугольникомъ возможно, это вытекаетъ изъ діаграммы векторовъ на фиг. 295, гдѣ равнодѣйствующая R векторовъ 2 и 3 равна и противоположна по направленію вектору 1. Слѣдовательно, если мы, согласно фиг. 296, включимъ двѣ фазы послѣдовательно, то электродвижущая сила въ обѣихъ вмѣстѣ въ каждое мгновеніе будетъ равна электродвижущей силѣ третьей фазы. Оба вольтметра дадутъ одно и то же отклоненіе. Такимъ образомъ, если мы всю обмотку представимъ въ видѣ сплошной замкнутой на себя кольцевой обмотки, то этимъ мы включимъ два давленія другъ другу навстрѣчу, а по отношенію къ внѣшней цѣпи другъ другу параллельно. Внутренніе токи при этомъ не смогутъ возникнуть, такъ какъ электродвижущія силы въ параллельно включенныхъ вѣтвяхъ якоря будутъ взаимно уравновѣшиваться. Сходство съ двумя параллельно включенными въ одну и ту же сѣть машинами въ этомъ случаѣ довольно ясно. Легко также видѣть, что напряженіе между двумя внѣшними проводами при соединеніи треугольникомъ равновелико напряженію одной фазы.

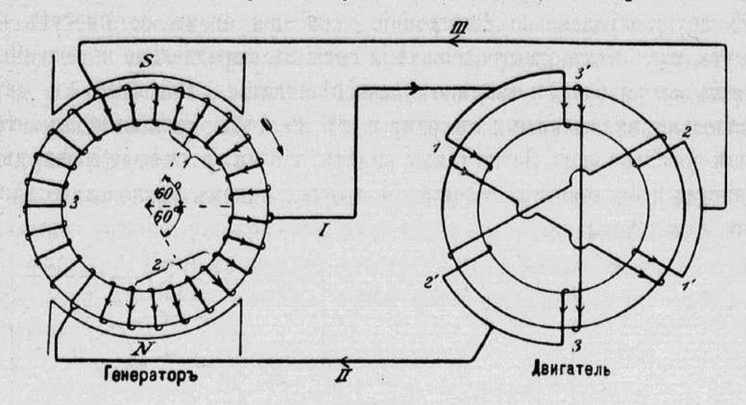


Фиг. 295. Фиг. 296.

Но распредѣленіе тока при соединеніи треугольникомъ представляетъ вначалѣ нѣкоторыя трудности для пониманія. Уже тотъ фактъ, что обходятся съ тремя проводниками, кажется довольно непонятнымъ. Указаніе на то, что электричество нигдѣ не можетъ скопляться, что, слѣдовательно, проводникъ для одной фазы въ каждый моментъ служитъ одновременно и обратнымъ проводникомъ для двухъ остальныхъ, все же не уясняетъ намъ вполнѣ наше недоумѣніе. Поэтому мы разсмотримъ лучше токъ генератора, токъ въ сѣти и токъ статора въ двухъ указанныхъ уже раньше крайнихъ положеніяхъ.

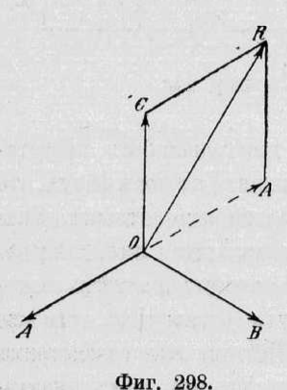
Въ первый изъ разсматриваемыхъ моментовъ (фиг. 293) фаза 1 генератора находится какъ разъ противъ середины полюса, и индуктируемая въ немъ электродвижущая сила будетъ наибольшею. Пренебрежемъ опять сдвигомъ фазъ, тогда сила тока въ этой фазѣ будетъ наибольшею, въ то время какъ въ двухъ другихъ фазахъ она будетъ составлять поло-

вину даннаго значенія. Стало быть, если токъ въ фазѣ 1 равенъ i_{max}, то въ остальныхъ двухъ фазахъ будетъ $^1/_2 \cdot i_{max}$ и токъ въ проводникѣ I сѣти въ изображенный моментъ будетъ составлять 1,5 i_{max}. Часть i_{max} этого полезнаго потока идетъ черезъ фазу 1—1′ двигателя, въ то время, какъ че-



Фиг. 297.

резъ фазы 3—3′ и 2′—2 послѣдовательно проходитъ токъ половинной силы. Слѣдовательно, какъ у двигателя, такъ и у генератора индуктирующаяся сторона катушки, проводящая наибольшій токъ, находится между индуктирующимися частями двухъ другихъ катушекъ, проводящихъ токъ одного направленія, но половинной силы. Между 1′ и 2 оба тока статора соединяются вмѣстѣ, и токъ въ 1,5·i_{max} течетъ по проводнику III обратно въ генераторъ, въ то время, какъ проводникъ II сѣти остается безъ тока.



Фиг. 298.

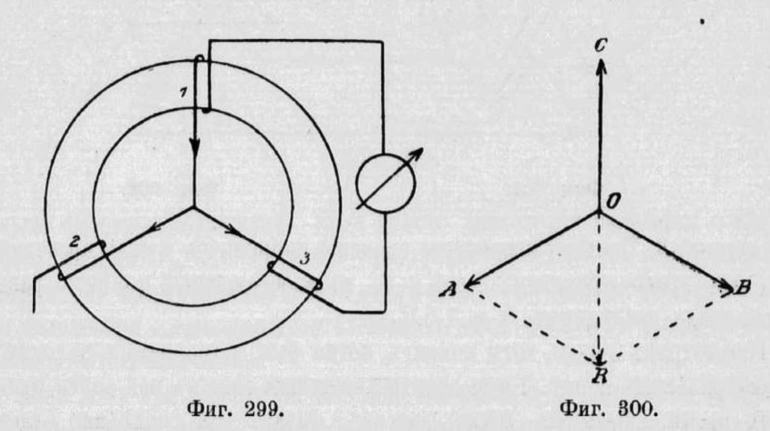
При второмъ крайнемъ положеніи фаза 3 генератора находится въ нейтральномъ поясѣ, стало быть, будетъ безъ тока (фиг. 297), въ то время какъ фазы 1 и 2 проводятъ токъ $i_{max} \cdot sin\, 60^\circ = 0,866 \cdot i_{max}$. Изъ нихъ черезъ проводникъ I сѣти пойдетъ токъ $2 \cdot 0,866 \cdot i_{max} = 1,73 \cdot i_{max}$. Это въ то же время, какъ указываетъ ниже діаграмма векторовъ, будетъ наибольшимъ токомъ въ сѣти. Одна половина этого послѣдняго течетъ черезъ фазу статора 3—3′ и проводникъ II сѣти обратно въ генераторъ, а другая черезъ фазу 1—1′ и черезъ проводникъ III сѣти туда же. Такимъ образомъ, въ тотъ моментъ, когда проводникъ

сѣти проводитъ наибольшій или половинный токъ сѣти, въ одной изъ фазъ генератора и статора токъ равенъ нулю.

Слѣдовательно, мы находимъ, что наибольшее значеніе тока въ сѣти больше наибольшаго значенія фазоваго тока, и что оба максимума наступаютъ не одновременно. Это становится еще болѣе очевиднымъ, если обратимся къ діаграммѣ векторовъ. При этомъ мы должны принять во вниманніе, что не начала соединены другъ съ другомъ, а конецъ одной фазы присоединяется къ началу сосѣдней. Поэтому, при сложеніи токовъ на фиг. 298 мы должны одинъ фазовый токъ взять съ обратнымъ знакомъ. Если мы сложимъ, напримѣръ, векторъ OC и обозначенный пунктиромъ векторъ OA, то получимъ токъ въ сѣти OR. Этотъ послѣдній будетъ въ 1,73 раза больше фазоваго тока OC и смѣщенъ по отношенію къ послѣднему на 30°.

110. Соединеніе звѣздой.

При соединеніи треугольникомъ конецъ одной фазы мы приключаемъ къ началу слѣдующей фазы, при соединеніи же звѣздой мы соединяемъ начала всѣхъ трехъ фазъ между собою (фиг. 299). Условіе возможности подобнаго соединенія безъ появленія какихъ-либо ненормальностей выте-

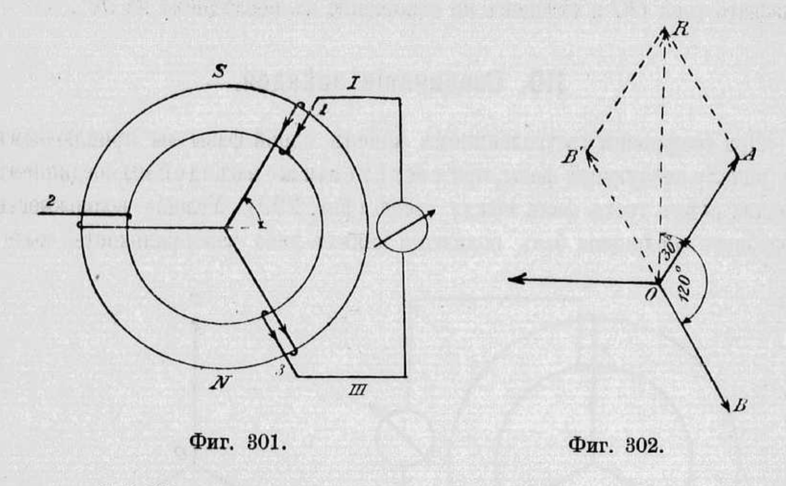


Фиг. 299. Фиг. 300.

каетъ изъ фиг. 300, гдѣ построена равнодѣйствующая векторовъ OA и OB двухъ фазовыхъ токовъ. Эта послѣдняя равна и противоположна по направленію вектору OC третьей фазы. Слѣдовательно, сумма трехъ токовъ въ каждое мгновеніе равна нулю, т. е. токъ, притекающій въ нулевую точку, строго равенъ току, утекающему отъ этой послѣдней, безъ необходимости выравниванія послѣдняго. Если, напримѣръ, катушка 1 изображеннаго на фиг. 299 генератора расположена противъ середины по-

люсовъ, то, если пренебречь смѣщеніемъ фазъ, токъ въ ней окажется наибольшимъ. Онъ тогда раздѣляется прямо на двѣ части и идетъ дальше черезъ фазу 2 и 3.

Не трудно понять, что при соединеніи звѣздой полезный токъ по своей силѣ и фазѣ равнозначущъ съ токомъ въ одной фазѣ. Наоборотъ, напряженіе въ сѣти не будетъ равно напряженію въ одной фазѣ, а будетъ равняться напряженію двухъ послѣдовательно или, лучше, другъ другу навстрѣчу включенныхъ фазъ. На фиг. 299, напримѣръ, вольтметръ включенъ между концами 1 и 3 фазы. Въ изображаемый моментъ въ катушкѣ 1 будетъ индуктироваться наибольшая электродвижущая сила. Къ ней прибавляется мгновенное значеніе $E_{max} \cdot sin 30° = 0{,}5 E_{max}$, индуктируемое



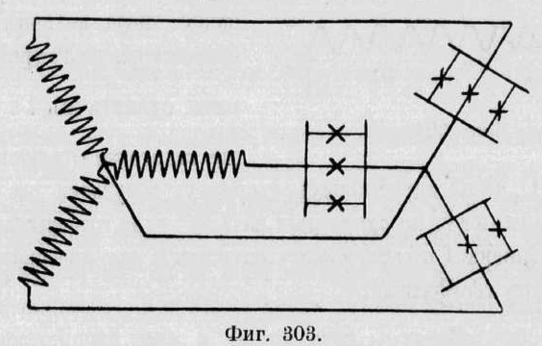
Фиг. 301. Фиг. 302.

въ катушкѣ 3. Поэтому мгновенное значеніе напряженія между проводами въ сѣти, присоединенными къ 1 и 3, въ изображенный моментъ равно суммѣ этихъ послѣднихъ, т. е. $1{,}5 E_{max}$.

Разсмотримъ теперь тотъ моментъ, когда фаза 2 генератора находится въ нейтральномъ поясѣ. Тогда электродвижущая сила въ ней равна нулю, въ то время, какъ въ двухъ другихъ фазахъ эта послѣдняя будетъ $E_{max} \cdot sin 60° = 0{,}886 E_{max}$ (фиг. 301). Нанесемъ опять извѣстнымъ уже намъ образомъ стрѣлки на торцевыхъ соединеніяхъ, тогда увидимъ, что обѣ электродвижущія силы складываются. Вольтметръ, включенный между проводниками I и III сѣти, укажетъ въ данный моментъ напряженіе $2 E_{max} \cdot sin 60° = 1{,}73 E_{max}$. Не трудно видѣть, что это напряженіе будетъ наибольшимъ мгновеннымъ значеніемъ напряженія, какое только возможно получить между двумя проводниками сѣти.

Сложимъ, теперь, два фазовыхъ напряженія или два напряженія въ лучахъ звѣзды [1]) діаграммы векторовъ; тогда замѣтимъ, что всѣ начала фазъ соединяются между собою. Катушки же будутъ соединены не послѣдовательно, а другъ другу навстрѣчу. Мы должны тогда при векторіальномъ сложеніи одинъ изъ векторовъ взять отрицательнымъ, т. е. вмѣсто вектора OB ввести противоположно направленный векторъ OB', фиг. 302. Изъ OA и OB' получается равнодѣйствующая OR, которая представитъ намъ напряженіе въ сѣти по величинѣ и фазѣ. Дѣйствующее значеніе ея, согласно діаграммѣ, въ 1,73 раза больше напряженія въ звѣздѣ, и по отношенію къ этой послѣдней имѣетъ сдвигъ фазы въ 30°, слѣдовательно, $120 + 30 = 150°$.

Понятно, генераторъ можетъ имѣть соединеніе звѣздой, а двигатель треугольникомъ, и наоборотъ. При передачѣ энергіи на большія разстоянія предпочитаютъ, естественно, соединеніе какъ генераторовъ, такъ и двигателей звѣздой, такъ какъ напряженіе въ сѣти при этомъ въ 1,73 раза



Фиг. 303.

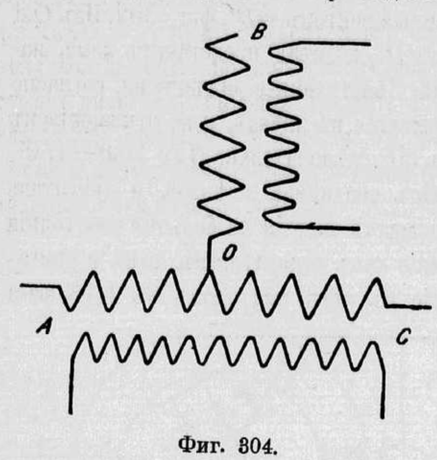
больше фазоваго напряженія. Если вмѣсто двигателей включены сопротивленія, напримѣръ, лампы, то они точно также могутъ быть соединены или звѣздою или треугольникомъ. При этомъ слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что только при соединеніи треугольникомъ число лампъ въ трехъ вѣтвяхъ можетъ быть различнымъ.

Если же и при соединеніи звѣздой желательно осуществить неравномѣрную нагрузку трехъ фазъ, безъ нарушенія постоянства напряженія, столь необходимаго для лампочекъ накаливанія, то, согласно фиг. 303, нулевыя точки генератора и сѣти необходимо соединить между собою. Этотъ нулевой проводникъ выполняетъ ту же задачу, что и нулевой проводникъ въ трехпроводной системѣ сѣти постояннаго тока.

---

[1]) Т. е. напряженіе между нулевымъ и конечнымъ зажимомъ каждой изъ фазъ. Ред.

Особый видъ соединенія звѣздой представляетъ собой соединеніе Скотта (Scott), которое служитъ для преобразованія трехфазнаго тока въ двухфазный. Для этого примѣняются два однофазныхъ трансформатора AC и OB. Трансформаторъ OB присоединяется къ серединѣ витковъ трансформатора AC. Концы ABC присоединяются къ проводамъ сѣти трехфазнаго тока, т. е. къ смѣщеннымъ на 120° напряженіямъ AC, CB и BA. Между точками O и B возникаетъ со стороны трехфазнаго тока напряженіе, которое смѣщено на 180° относительно напряженія AC, и величины ихъ относятся между собою какъ $\frac{1}{2}\sqrt{3}$ къ 1. Если, теперь въ трансформаторѣ OC отношеніе числа витковъ двухфазной стороны къ числу трехфазной стороны сдѣлать въ $1 : \frac{1}{2}\sqrt{3}$ больше такого же отношенія въ трансформаторѣ AC, то на двухфазныхъ сторонахъ получатся два напряженія, равныя по величинѣ, но сдвинутыя на 180° одно относительно другого. Конечно, соединеніе Скотта можетъ служить и для преобразованія двухфазнаго тока въ трехфазный.



Фиг. 304.

111. Мощность трехфазнаго тока.

Пусть, независимо отъ схемы соединенія, обозначаютъ:

e_1 фазовое напряженіе, при соединеніи звѣздой напряженіе въ лучѣ звѣзды,

i_1 фазовый токъ,

φ уголъ между напряженіемъ и фазовымъ токомъ,

e напряженіе сѣти,

i токъ въ сѣти,

P полная мощность въ ваттахъ.

Тогда для соединенія звѣздой или треугольникомъ мощность на фазу будетъ:

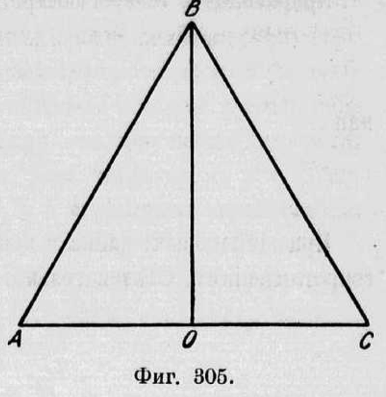
$$e_1 \cdot i_1 \cdot \cos\varphi.$$

Для соединенія звѣздой мы имѣли:

$$e = 1{,}73 \cdot e_1,$$
$$i = i_1.$$

Отсюда при соединеніи звѣздой полная мощность всѣхъ трехъ фазъ будетъ:

$$P = 3 \cdot e_1 \cdot i_1 \cdot \cos\varphi = 2 \cdot \frac{e}{1{,}73} \cdot i \cdot \cos\varphi =$$
$$= \sqrt{3} \cdot e \cdot i \cdot \cos\varphi.$$



Фиг. 305.

Для соединенія треугольникомъ мы имѣли:

$$i = 1{,}73 \cdot i_1,$$
$$e = e_1.$$

Отсюда:

$$P = 3 \cdot e_1 \cdot i_1 \cdot \cos\varphi = 3 \cdot e \cdot \frac{i}{1{,}73} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot e \cdot i \cdot \cos\varphi. \quad (68)$$

Слѣдовательно, если напряженіе и токъ въ сѣти ввести въ выраженіе мощности, то для обѣихъ системъ соединеній получаемъ одну и ту же формулу.

Теперь слѣдовало бы сравнить процентныя потери въ сѣти трехфазнаго тока съ процентными потерями въ сѣти постояннаго тока. Для этой цѣли мы разсмотримъ случай, когда надо на одно и то же разстояніе передать одну и ту же мощность. При этомъ пусть для этой цѣли одинъ разъ будетъ примѣненъ постоянный токъ, а другой разъ — трехфазный, предполагая оба раза одно и то же напряженіе въ сѣти и одинаковый расходъ энергіи. Спрашивается, теперь, какъ будутъ относиться между собою объемы мѣди, потребной въ обоихъ случаяхъ. Обозначимъ сопротивленіе одного провода постояннаго тока черезъ w_1, а трехфазнаго тока черезъ w_2, соотвѣтствующія сѣченія черезъ q_1 и q_2 и объемы мѣди черезъ V_1 и V_2 тогда имѣемъ:

Постоянный токъ:	Перемѣнный токъ:
$P = e \cdot i$	$P = \sqrt{3} \cdot e \cdot i \cos\varphi$
$i = \frac{P}{e}$	$i = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot e \cdot \cos\varphi}$
Полная потеря въ прямомъ и обратномъ проводѣ:	Полная потеря въ трехъ проводахъ:
$2 \cdot i^2 \cdot w_1 = 2 \cdot \frac{P^2 \cdot w_1}{e^2}$	$3 \cdot i^2 \cdot w_2 = \frac{P^2 \cdot w_2}{e^2 \cdot \cos^2\varphi}$.

Приравняемъ, теперь, потери другъ другу, тогда получаемъ:

$$2 \cdot w_1 = \frac{w_2}{cos^2 \varphi}$$

или

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{1}{2 \cdot cos^2 \varphi}.$$

При одинаковыхъ длинахъ поперечныя сѣченія обратно пропорціональны сопротивленіямъ. Слѣдовательно:

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{1}{2 \cdot cos^2 \varphi}.$$

Далѣе, при одинаковыхъ одиночныхъ длинахъ объемы мѣди относятся между собою какъ сумма одиночныхъ поперечныхъ сѣченій. Слѣдовательно, если V_1 будетъ объемъ мѣди при постоянномъ токѣ, а V_2 объемъ мѣди при трехфазномъ токѣ, подставляя сюда полученное раньше значеніе отношенія q_2/q_1, получаемъ:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{3q_2}{2q_1} = \frac{0{,}75}{cos^2 \varphi}.$$

Слѣдовательно, если $cos\,\varphi = 1$, т. е. токъ имѣетъ одинаковую фазу съ напряженіемъ, то для трехфазной сѣти необходимо только 75% того количества мѣди, которое потребно при сѣти постояннаго тока. Но эти соотношенія при сдвигѣ фазъ становятся значительно менѣе благопріятными, что видно изъ нашего уравненія.

Перейдемъ, теперь, къ измѣренію мощности. Послѣднее будетъ наиболѣе наглядно при соединеніи звѣздою, нулевая точка котораго доступна. Катушку напряженія ваттметра включаютъ между нулевой точкой и концомъ какой-либо фазы, въ то время какъ черезъ катушку тока ваттметра пропускаютъ токъ этой фазы.

Ваттметръ показываетъ тогда мощность этой фазы, и при одинаковой нагрузкѣ всѣхъ трехъ фазъ полная мощность будетъ въ три раза больше. При неравномѣрной нагрузкѣ фазъ необходимо произвести измѣреніе для каждой фазы въ отдѣльности и полученныя числа ваттъ сложить. Для этого потребуется или три ваттметра или переключеніе каждый разъ одного и того же ваттметра.

Но можно катушку напряженія ваттметра приключать не къ напряженію звѣзды, а включать въ главное напряженіе, т. е. въ сѣть. Такого рода измѣреніе возможно одинаково какъ при соединеніи звѣздой, такъ и треугольникомъ и требуетъ двухъ ваттметровъ, которые нужно включать совершенно одинаково. На фиг. 306, напримѣръ, изображенныя слѣва фазы генератора 1 и 3 присоединены къ лѣвымъ зажимамъ катушекъ тока ваттметровъ. Обѣ катушки напряженія своими нижними концами приключены къ катушкамъ тока, а своими верхними концами—къ тому проводнику сѣти, который не присоединенъ къ катушкѣ тока. Если тогда e_1, e_2 и e_3 мгновенныя значенія напряженія звѣзды и i_1, i_2 и i_3 мгновенныя значенія тока, то мгновенное значеніе мощности будетъ:

$$P = e_1 \cdot i_1 + e_2 \cdot i_2 + e_3 \cdot i_3.$$

Фиг. 306.

Далѣе, сумма трехъ токовъ, которые изъ фазъ генератора идутъ въ сѣть, въ каждый моментъ равна нулю. Слѣдовательно, мы получаемъ:

$$i_2 = -(i_1 + i_3).$$

Подставимъ это значеніе въ уравненіе для P, тогда будетъ:

$$P = e_1 \cdot i_1 - e_2\,(i_1 + i_3) + e_3 \cdot i_3$$

или, преобразуя его, получаемъ:

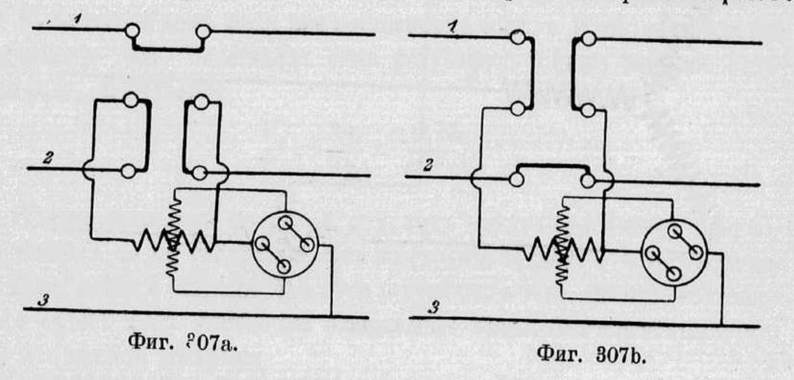
$$P = (e_1 - e_2) \cdot i_1 + (e_3 - e_2) \cdot i_3.$$

При этомъ $e_1 - e_2$ представляетъ не что иное, какъ мгновенное значеніе главнаго напряженія, приключеннаго къ катушкѣ напряженія верхняго ваттметра. Точно также $e_2 - e_3$ будетъ мгновенное значеніе главнаго напряженія у нижняго ваттметра. Произведеніе $(e_1 - e_2) \cdot i_1$ создаетъ мгно-

венный вращающій моментъ въ верхнемъ ваттметрѣ и произведеніе $(e_3 - e_2) \cdot i_3$ вызываетъ мгновенный вращающій моментъ въ нижнемъ ваттметрѣ. Тотъ фактъ, что въ скобкахъ у насъ появились разности, а не суммы, объясняется тѣмъ, что обѣ соотвѣтствующія фазы включены другъ другу навстрѣчу.

Ваттметръ, благодаря инерціи подвижной его системы, указываетъ среднее ариѳметическое изъ мощностей. Полная мощность получается, слѣдовательно, изъ сложенія обѣихъ мощностей. При этомъ необходимо обращать вниманіе на знаки. Обыкновенно, конечно, оба члена правой части положительны, т. е. ваттеметры при вышеуказанной схемѣ даютъ отклоненія оба въ одну сторону. Въ этомъ случаѣ необходимо показанія ваттметровъ складывать.

Если въ цѣпи имѣется довольно значительная самоиндукція, то при указанной схемѣ ваттметры даютъ отклоненія въ разныя стороны. На фиг. 302



Фиг. 307a. Фиг. 307b.

векторъ напряженія BO' отстаетъ отъ напряженія въ цѣпи OR на 30°. Если же токъ отстаетъ отъ напряженія OB' больше, чѣмъ на 60°, то разность фазъ между даннымъ фазовымъ токомъ и напряженіемъ въ сѣти OR больше 90°. Тогда соотвѣтствующій ваттметръ даетъ отклоненія въ обратномъ направленіи, т. е. измѣряетъ отрицательную мощность. Полная мощность теперь будетъ равна не суммѣ, а уже разности показаній обоихъ ваттметровъ. Если при этомъ ваттметръ приспособленъ для отклоненій только въ одну сторону, то необходимо въ катушкѣ напряженія коммутировать токъ, чтобы отклоненія получались въ обратномъ направленіи.

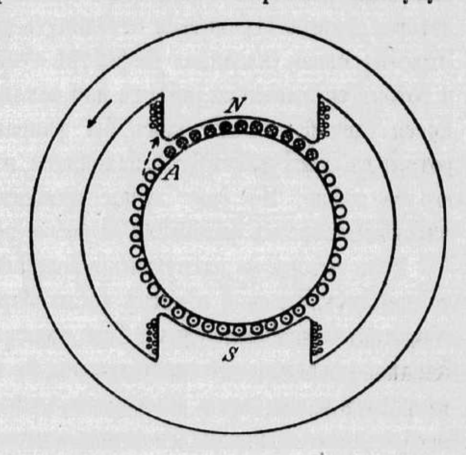
Измѣреніе можно произвести и при помощи одного ваттметра, для чего необходимо имѣть ртутный куммутаторъ съ тремя дугами. На фиг. 307a токъ проводника 2 сѣти идетъ черезъ катушку тока ваттметра, тогда какъ послѣ переключенія всѣхъ трехъ дугъ (фиг. 307b) токъ проводника 1 сѣти

идетъ уже черезъ катушку тока ваттметра. Катушка напряженія ваттметра въ обоихъ случаяхъ присоединяется съ одной стороны къ катушкѣ тока, а съ другой къ проводнику 3, не находящемуся въ соединеніи съ катушкой тока. Ртутный коммутаторъ даетъ возможность измѣнять направленіе тока.

Если желательно избѣжать двойного отсчета, то необходимо примѣнить ваттметръ, состоящій изъ двухъ отдѣльныхъ ваттметровъ. Подвижныя системы этого прибора закрѣплены на одной оси, такъ что развиваемые вращающіе моменты складываются или соотвѣтственно вычитаются.

112. Общіе принципы работы ротора.

Послѣ того какъ мы разсмотрѣли образованіе вращающагося поля, а также схему соединеній статора, прослѣдимъ теперь дѣйствіе вращающагося поля на роторъ. Желѣзный цилиндръ, помѣщенный въ поломъ пространствѣ статора, составляется изъ ряда желѣзныхъ листовъ и на своей наружной боковой поверхности имѣетъ или коротко замкнутую или фазовую обмотку. Коротко-замкнутая обмотка состоитъ сплошь изъ отдѣльныхъ замкнутыхъ на себя витковъ, или изъ стержней, помѣщенныхъ въ каналахъ и замкнутыхъ между собою при помощи колецъ, расположенныхъ на торцевыхъ поверхностяхъ. Наоборотъ, фазовая обмотка соотвѣтствуетъ обмоткѣ статора. Ея концы идутъ къ контактнымъ кольцамъ, такъ что при пускѣ въ ходъ въ цѣпь ротора можетъ быть включено сопротивленіе.



Фиг. 308.

Мы видѣли, что при разсмотрѣнной до сихъ поръ двухполюсной обмоткѣ поле статора за одинъ періодъ генератора дѣлаетъ одинъ оборотъ. Для того, чтобы нагляднѣе уяснить себѣ дѣйствіе этого вращающагося поля, замѣнимъ его колесомъ съ электромагнитами, вращающимися на фиг. 308 противъ часовой стрѣлки. Силовыя линіи электромагнитовъ пронизываютъ на фигурѣ роторъ по направленію противъ часовой стрѣлки. Стало быть, роторъ вращается какъ будто по часовой стрѣлкѣ въ неподвижномъ

полѣ. По извѣстному уже намъ правилу, мы должны въ проволокахъ передъ сѣвернымъ полюсомъ поставить крестикъ, а въ проволокахъ передъ южнымъ—точку, чтобы указать тѣмъ направленіе индуктируемаго тока.

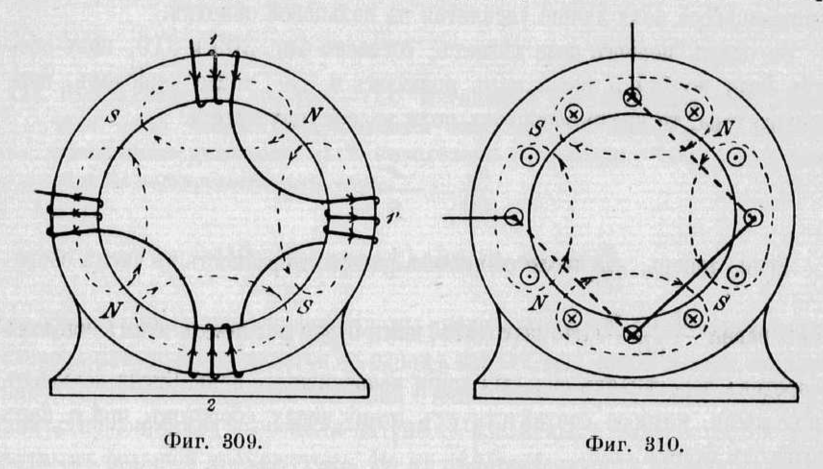
Далѣе мы предположимъ, что взятые нами электромагниты представятъ намъ собственно не силовыя линіи, создаваемыя статоромъ, а равнодѣйствующее поле N, которое получается отъ взаимодѣйствія токовъ статора и ротора. Въ этомъ случаѣ мы не имѣемъ никакого сдвига фазъ между индуктируемой въ роторѣ электродвижущей силой и токомъ ротора. Передъ серединой полюсовъ будетъ не только максимумъ тока, но и максимумъ электродвижущей силы.

Индуктируемый токъ, согласно закону Ленца, противодѣйствуетъ движенію. Слѣдовательно, токъ въ роторѣ стремится воспрепятствовать относительному смѣщенію между магнитнымъ полемъ и проволокой ротора, поэтому этотъ послѣдній увлекается вмѣстѣ въ сторону вращенія поля. Для того, чтобы уяснить себѣ это еще больше, поплывемъ, согласно правилу Ампера, у A за плоскость фигуры и будемъ смотрѣть на сѣверный полюсъ. Тогда, какъ мы знаемъ, будетъ существовать сила, которая будетъ стремиться оттолкнуть сѣверный полюсъ влѣво отъ насъ. Этою-то силою, указанною на фигурѣ пунктирною стрѣлкою, магнитное поле и роторъ связываются вмѣстѣ или заклиниваются между собою. Вращающіеся электромагниты какъ бы упираются въ упоръ, существующій у ротора въ томъ мѣстѣ, гдѣ находится пунктирная стрѣлка, и увлекаютъ его за собою. Но еще лучше сравнить съ тѣмъ случаемъ, когда немагнитный остовъ увлекаетъ за собою роторъ при помощи ремня.

Если роторъ не нагруженъ и вращается безъ тренія въ подшипникахъ, то при двухполюсной обмоткѣ число оборотовъ его въ секунду равно числу оборотовъ первичнаго поля. Такъ какъ въ роторѣ тогда не происходитъ никакого пересѣченія силовыхъ линій, то электродвижущая сила и токъ въ роторѣ равны нулю. Наоборотъ, если роторъ нагруженъ, то для созданія необходимаго вращающаго момента нуженъ опредѣленный токъ въ роторѣ. Вслѣдствіе этого роторъ отстаетъ въ числѣ оборотовъ отъ поля, т. е. получается у него нѣкоторое скольженіе. Разность эта въ числѣ оборотовъ вызываетъ пересѣченіе силовыхъ линій проволоками ротора, такимъ образомъ въ нихъ индуктируется необходимый для вращающаго момента токъ ротора. При нормальныхъ условіяхъ достаточною является очень незначительная электродвижущая сила, слѣдовательно, небольшое также скольженіе, чтобы въ маломъ сопротивленіи мѣди ротора создать достаточный токъ. Поэтому разность въ оборотахъ или скольженіе всегда очень незначительны и составляютъ часто только 1—2%.

Теперь станетъ яснымъ, почему мы сравненіе съ ремнемъ предпочли сравненію съ упоромъ. При передачѣ ремнемъ, число оборотовъ увлекаемаго желѣзнаго цилиндра будетъ, изъ-за скольженія ремня, также меньше вращающагося желѣзнаго остова. Это паденіе, вслѣдствіе скольженія ремня, числа оборотовъ мы можемъ, слѣдовательно, довольно удачно сравнить со скольженіемъ ротора.

Если, согласно предыдущему, число оборотовъ ротора при нормальныхъ условіяхъ приблизительно равно числу оборотовъ первичнаго поля, то отсюда вытекаетъ, что двухполюсная обмотка при обычномъ числѣ періодовъ непримѣнима. На станціяхъ, служащихъ для освѣщенія и передачи энергіи, обыкновенно, ради спокойнаго горѣнія лампъ, работаютъ при 50 періодахъ въ секунду. Слѣдовательно, при двухполюсной обмоткѣ статора



Фиг. 309. Фиг. 310.

поле и роторъ дѣлали бы 50 оборотовъ въ секунду или 3 000 оборотовъ въ минуту. Такого высокаго числа оборотовъ избѣгаютъ путемъ примѣненія многополюсныхъ обмотокъ. Для этой цѣли катушки, размѣщенныя при двухполюсной обмоткѣ по всей окружности, сдвигаютъ вмѣстѣ такъ, чтобы онѣ располагались теперь на полуокружности, и полагаютъ, что къ этимъ катушкамъ соотвѣтственнымъ образомъ присоединяются катушки другой половины. На фиг. 309, напримѣръ, соединенныя вмѣстѣ катушки 1 и 1′ трехфазнаго двигателя фиг. 309, стр. 167, располагаются теперь не діаметрально противоположно другъ другу, какъ раньше, а смѣщены одна относительно другой на 90°. Катушки 2 и 2′, принадлежащія той же фазѣ, присоединены послѣдовательно, при этомъ, ради ясности, на фиг. 309 вычерчена только одна фаза, но направленіе тока въ другихъ фазахъ опредѣляется отсюда само собою. Индуктирующаяся сторона катушки съ наибольшимъ

токомъ помѣщается между индуктирующимися сторонами двухъ другихъ катушекъ, которыя проводятъ токъ одинаковаго направленія, но вдвое слабѣе. Предположимъ, что наибольшій токъ входитъ на фиг. 309 въ катушку 1, тогда, на основаніи правила Ампера, мы получимъ обозначенныя на фигурѣ пунктиромъ силовыя линіи и положеніе четырехъ полюсовъ.

На фиг. 310 изображена еще четырехполюсная барабанная обмотка, у которой опять таки представлена обмотка только одной фазы. У другихъ фазъ разставлены въ каналахъ только перья и острія стрѣлокъ въ томъ предположеніи, что токъ въ вычерченной вполнѣ фазѣ будетъ наибольшимъ, а въ двухъ другихъ будетъ составлять половину. На практикѣ примѣняютъ исключительно только барабанную обмотку, хотя образованіе вращающагося поля лучше уясняется на кольцевой обмоткѣ.

За одинъ періодъ поле дѣлаетъ, согласно фиг. 309 и 310, полъ-оборота. Если вообще p число паръ полюсовъ и ν_1 число періодовъ, первичнаго тока, то число оборотовъ поля въ секунду будетъ:

$$\frac{n_1}{60}=\frac{\nu_1}{p}.$$

Если, теперь, $\frac{n}{60}$ число оборотовъ ротора, то разность въ числѣ оборотовъ равна $\frac{n_1-n}{60}$. Это выходитъ, какъ будто роторъ съ этимъ числомъ оборотовъ пересѣкаетъ силовыя линіи неподвижнаго поля. Число періодовъ скольженія, которое соотвѣтствуетъ этому числу оборотовъ, при p паръ полюсовъ будетъ:

$$\nu=\frac{n_1-n}{60}\cdot p.$$

Что касается направленія вращенія ротора, то оно указывается направленіемъ вращенія вращающагося поля. Если переключить два главныхъ провода между собою, то получимъ направленіе противоположное.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ.

---

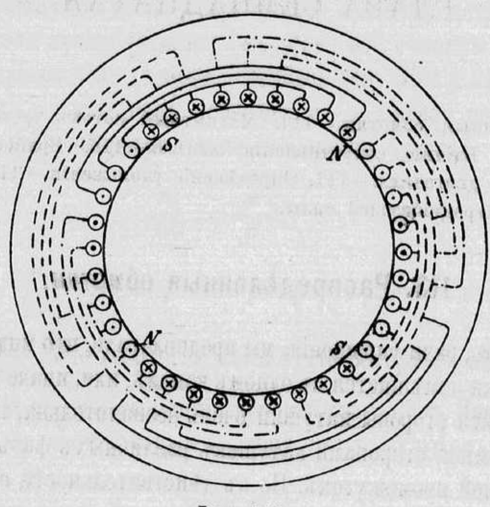
113. Распредѣленныя обмотки.—114. Магнитный потокъ трехфазнаго двигателя.—115. Вліяніе сопротивленія желѣза.—116. Вращающій моментъ трехфазнаго двигателя.—117. Опредѣленіе скольженія.—118. Точное опредѣленіе электродвижущей силы.

113. Распредѣленныя обмотки.

До сихъ поръ, ради упрощенія, мы предполагали, что индуктирующаяся сторона катушки помѣщается въ одномъ каналѣ, или, иначе говоря, ширина индуктирующейся стороны катушки очень незначительна, такъ что между индуктирующимися сторонами катушекъ различныхъ фазъ остается свободнымъ большой промежутокъ. Но въ дѣйствительности проволоки одной индуктирующейся стороны катушки распредѣляются въ нѣсколькихъ каналахъ вдоль по окружности. Это дѣлается для созданія по возможности равномѣрнаго поля, а также ради помѣщенія въ одномъ каналѣ возможно малаго числа проволокъ. Вліяніе этого послѣдняго обстоятельства на самоиндукцію или разсѣяніе будетъ разсмотрѣно въ одной изъ послѣдующихъ статей (ст. 126). Обыкновенно выбираютъ отъ 2—5 каналовъ на индуктирующуюся сторону катушки въ статорѣ и отъ 3—7 каналовъ въ роторѣ. Число каналовъ въ статорѣ должно отличаться отъ числа каналовъ ротора, такъ какъ трехфазный двигатель очень легко можетъ начать работать, какъ неподвижный трансформаторъ, и не будетъ давать вращающаго момента.

Въ турбогенераторахъ, которые при большомъ числѣ оборотовъ паровыхъ турбинъ имѣютъ малое число полюсовъ, на каждую индуктирующуюся сторону катушки приходится большое число каналовъ.

На фиг. 311 изображена четырехполюсная распредѣленная катушечная обмотка двигателя, у которой разныя фазы отличаются различнымъ изображеніемъ торцевыхъ соединеній, а именно: сплошными линіями, пунктирными и пунктиромъ съ точками. При этомъ предполагается, что токъ въ фазѣ, обозначенной пунктиромъ и точками, обладаетъ наибольшею силою, въ то время какъ въ двухъ другихъ онъ половинной силы. Это на фиг. 311 обозначено посредствомъ болѣе жирнаго или болѣе слабаго крестика или точки. Правило Ампера теперь указываетъ, что обозначаемая посредствомъ N и S середина полюса находится тамъ, гдѣ соприкасаются двѣ индуктирующіяся стороны катушекъ, проходимыя токами противоположнаго направленія. Нейтральная линія всякій разъ располагается посрединѣ группы проволокъ, проходимыхъ токомъ въ одномъ направленіи.



Фиг. 311.

Для статора и ротора необходимо еще разсмотрѣть стержневую обмотку винтомъ, которая равнозначна послѣдовательной обмоткѣ постояннаго тока. При этой обмоткѣ все время идутъ впередъ и послѣ обхода вокругъ приходятъ почти къ исходной точкѣ. Если продолжать обмотку дальше, то, при слѣдующихъ обходахъ вокругъ, проволоки индуктирующихся сторонъ катушекъ приходятся одна на другую. Если обозначимъ черезъ z_1 число всѣхъ проволокъ, то, согласно стр. 167, шагъ обмотки будетъ:

$$y = \frac{z_1 \pm 2}{2p},$$

при этомъ y должно быть нечетнымъ числомъ и z_1 должно дѣлится на 3, т. е. на число фазъ. Основныя положенія этой обмотки будутъ ясны только при очень большомъ числѣ проволокъ, такъ какъ неизбѣжная, незначительная диссиметрія затрудняетъ пониманіе. Итакъ, возьмемъ $z_1 = 54$, т. е. 18 проволокъ на фазу. Тогда при четырехполюсной обмоткѣ ($p = 2$):

$$y = \frac{54 \pm 2}{4} = 14 \text{ или } 13.$$

Здѣсь только $y = 13$ пригодно, такъ какъ иначе не получится однослойной замкнутой обмотки. Обмотка на фиг. 312 устроена по принципу звѣзды и фаза a проводитъ токъ наибольшей силы. Этотъ послѣдній течетъ въ томъ направленіи, въ какомъ мы обматываемъ, т. е. отъ нулевой точки къ 1, затѣмъ вдоль боковой поверхности барабана за плоскость чертежа и по задней наружной поверхности къ $1 + 13 = 14$ и т. д., согласно схемѣ:

1	14		10
27	40	23	36
53	12	49	8
25	38	21	34
51	10	47	6

Если мы затѣмъ изъ точки 6 пойдемъ въ $6 + 13 = 19$, то получимъ обыкновенную обмотку постояннаго тока. Послѣдняя безъ особаго затрудненія можетъ быть соединена треугольникомъ, если мы присоединимъ провода цѣпи къ тремъ точкамъ, отстоящимъ другъ отъ друга на $^2/_3$ полюснаго дѣленія. Тогда ширина индуктирующейся стороны катушки, согласно фиг. 293, равна $^2/_3$ полюснаго дѣленія. Вмѣсто этого на фиг. 312 взято соединеніе звѣздой, подобно фиг. 299. При этомъ ширина индуктирующейся стороны катушки остается равной $^2/_3$ полюснаго дѣленія. Слѣдовательно, у пункта 19 мы начинаемъ новую фазу.

Ради ясности, каналы по окружности размѣщены одни надъ другими. Индуктирующіяся стороны первой фазы обведены жирной чертой, второй фазы слабой, а третьей пунктирной. Такъ какъ сумма двухъ токовъ въ каждое мгновеніе равна третьему, то токъ идетъ изъ двухъ послѣднихъ фазъ къ нулевой точкѣ и, стало быть, направленіе тока противоположно направленію обмотки, идущей отъ нулевой точки. Схема обмотки второй фазы будетъ:

19 — 32
45 — 4
17 — 30
43 — 2
15 — 28

28
41 — 54
13 — 26
39 — 52
11 — 24

Подобнымъ же образомъ получаемъ схему третьей фазы:

37 — 50
9 — 22
35 — 48
7 — 20
33 — 46

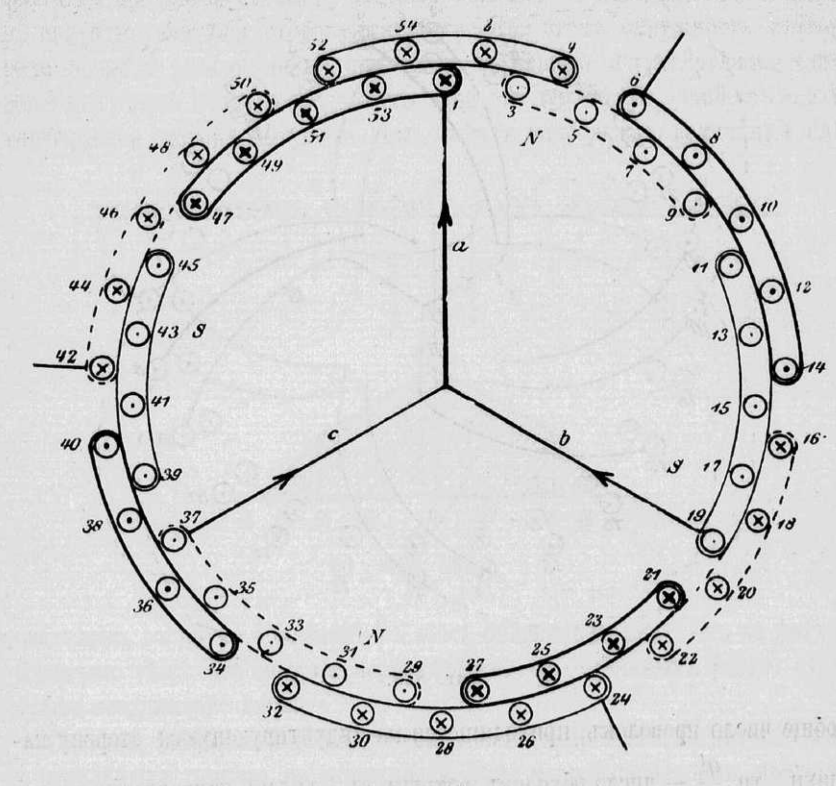
46
5 — 18
31 — 44
3 — 16
29 — 42

Обведя чертою проволоки, принадлежащія одной индуктирующейся сторонѣ катушки, мы увидимъ ясно, что отдѣльныя индуктирующіяся стороны катушекъ разныхъ фазъ перекрываютъ отчасти или захватываютъ другъ друга. При этомъ ширина индуктирующейся стороны катушки равна $^2/_3$ полюснаго дѣленія. Въ электрическомъ и магнитномъ отношеніи такая широкая индуктирующаяся сторона катушки не раціональна. Такъ, напримѣръ, изъ фиг. 312 ясно, что проволоки въ отдѣльныхъ мѣстахъ по окружности барабана, проходимыя токами противоположнаго другъ другу направленія, въ своемъ дѣйствіи взаимно уравновѣшиваются.

Поэтому рекомендуется обмотку постояннаго тока разрѣзать на части и тѣмъ избѣгать перекрытія и большой ширины индуктирующейся стороны катушки. Такимъ образомъ, въ два полныхъ обхода на фиг. 312 наматываютъ проволоки 1—14, 27—40, 53—12, 25—38. Поэтому, не принимая во вниманіе указанной уже диссимметріи, половина фазы 1 уже готова и индуктирующаяся сторона катушки, напр. 1, 53, занимаетъ приблизительно $^1/_3$ полюснаго дѣленія. Затѣмъ не идутъ, какъ раньше, съ 38 на 51, а къ пункту 2. Тогда при повтореніи обходовъ въ томъ же направленіи, проволоки 2, 54 и 52 прибавляются къ проволокамъ 1 и 53.

Въ дѣйствительности обмотка производится нѣсколько иначе, такъ какъ по изготовленіи первой половины фазы мѣняютъ направленіе на обратное. Это не имѣетъ какого либо принципіальнаго значенія, а преслѣдуетъ только ту цѣль, чтобы не помѣшать симметричному расположенію торцевыхъ соединеній. При этомъ избѣжать диссимметріи на фиг. 312 можно еще тѣмъ, что отказаться совершенно отъ условія $2p \cdot y = z \pm 2$ и сдѣлать число

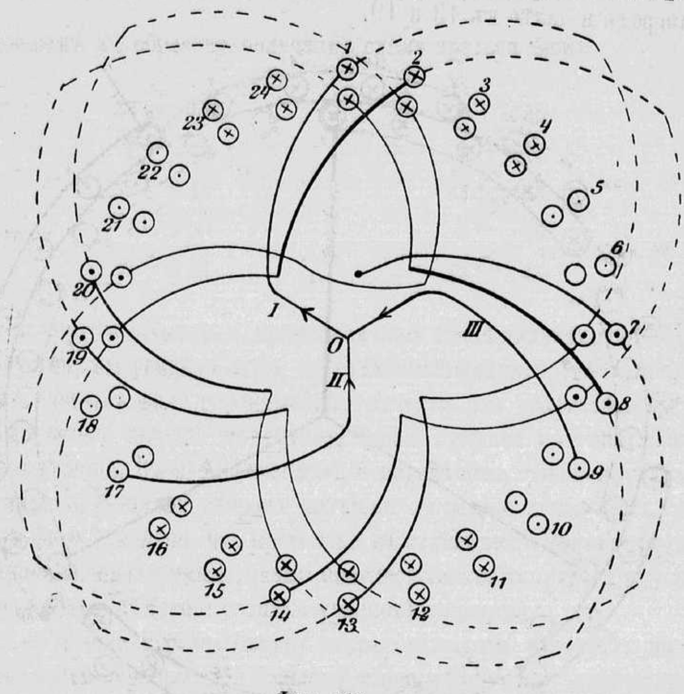
проволокъ на фазу кратнымъ числа полюсовъ. Возьмемъ, напримѣръ, на полюсъ и на фазу 4 стержня, т. е. два канала. Тогда при 4 полюсахъ мы получимъ 24 канала съ 48 стержнями (фиг. 313). Шагъ обмотки тогда равенъ полному полюсному дѣленію, слѣдовательно, 6 каналамъ. Пройдемъ вдоль первой фазы отъ точки 0 до 1, у точки 1 пойдемъ за плоскость чертежа, на задней торцевой поверхности къ 7, здѣсь изъ-за плоскости чертежа напередъ и далѣе къ 13 и 19.



Фиг. 312.

Изъ пункта 19 шагъ, вытекающій изъ правила обмотки, привелъ бы насъ въ 1, но мы соединимъ 19 (нижнее) посредствомъ жирно очерченнаго болѣе длиннаго соединенія съ 2 (верхнее). Тогда при второмъ обходѣ вокругъ мы проводимъ стержни 2, 8, 14, 20. Изъ 20 (нижнее) мы должны были бы, чтобы соединить послѣдовательно одинаково расположенные стержни, направиться въ 1 (нижнее) и въ этомъ направленіи идти дальше. Но для того, чтобы не нарушать симметріи торцевыхъ соединеній, мы соединимъ 20 (нижнее) съ 2 (верхнее) и измѣнимъ направленіе обмотки. При

обходѣ вокругъ далѣе, согласно правилу обмотки, стержень 2 (нижнее) уже соединяется съ 20, 14, 8. Затѣмъ при помощи болѣе длинныхъ, жирно очерченныхъ соединеній 8, 1 присоединяется группа 1, 19, 13, 7. Всѣ соединенія на задней торцевой поверхности охватываютъ цѣлое полюсное дѣленіе. Въ нашемъ случаѣ въ каждой фазѣ переднее торцевое соединеніе, приходящееся въ началѣ и концѣ, длиннѣе остальныхъ. Если q' будетъ



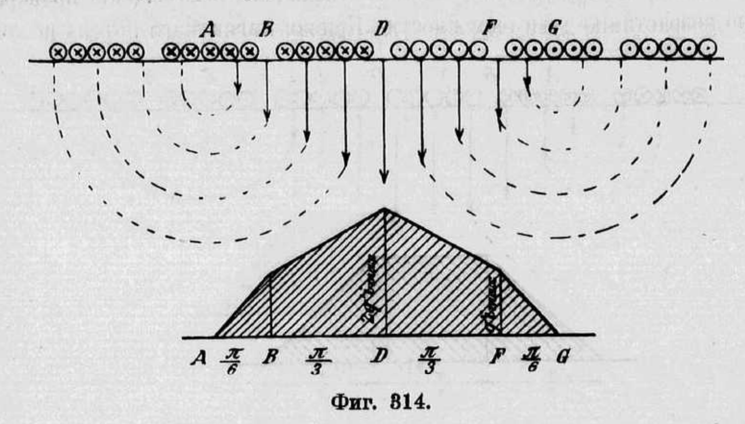
Фиг. 313.

вообще число проволокъ, приходящееся на индуктирующуюся сторону катушки, то $\frac{q'}{2}$ — число обходовъ вокругъ въ одномъ направленіи на каждую фазу и $\frac{q'}{2} - 1$ — число болѣе длинныхъ торцевыхъ соединеній, присоединенныхъ къ началу или концу фазы.

Остальныя фазы соединяются точно такимъ же образомъ. Начало 2-ой фазы должно быть смѣщено по отношенію къ первой фазѣ на $^2/_3$ полюснаго дѣленія, но мы можемъ при нашей четырехполюсной обмоткѣ вмѣсто проволоки 5 выбрать за начало одинаково расположенную проволоку 17.

114. Магнитный потокъ двигателя трехфазнаго тока.

Въ этой статьѣ намъ предстоитъ доказать, что силовое поле двигателя трехфазнаго тока имѣетъ по своему распредѣланію приблизительно синусоидальный характеръ, и опредѣлить магнитный потокъ, создаваемый статоромъ и роторомъ при различнаго рода обмоткахъ. Для этой цѣли на фиг. 314 представлена катушечная обмотка съ нѣсколькими каналами на индуктирующуюся сторону катушки. При этомъ окружность статора ради ясности развернута въ прямую и отдѣльныя индуктирующіяся стороны катушекъ немного отодвинуты одна отъ другой. Въ одной изъ индуктирующихся сторонъ катушекъ токъ имѣетъ наибольшую величину и, слѣ-



Фиг. 314.

довательно, въ двухъ сосѣднихъ съ нимъ половинную силу. Это на фигурѣ обозначено тѣмъ, что острія и перья стрѣлокъ въ отдѣльныхъ фазахъ отпечатаны неодинаково жирно.

Стрѣлки, направленныя внизъ, указываютъ напряженіе магнитнаго поля въ отдѣльныхъ точкахъ по окружности. Если мы всѣ проводники, проходимые токомъ по направленію отъ насъ за плоскость чертежа, соединимъ вмѣстѣ, то найдемъ, что точка D является серединою сѣвернаго полюса, въ то время, какъ въ точкахъ A и G сѣверный полюсъ переходитъ въ южный. Слѣдовательно, отъ точки D напряженіе поля по обѣ стороны этой послѣдней падаетъ соотвѣтственно дѣйствующему въ отдѣльныхъ мѣстахъ окружности возбужденію.

Для нахожденія имѣющагося возбужденія въ различныхъ точкахъ окружности, замѣтимъ, что силовая линія создается тѣми ампервитками, которые обхватываются соотвѣтствующей силовой линіей. Отсюда, если

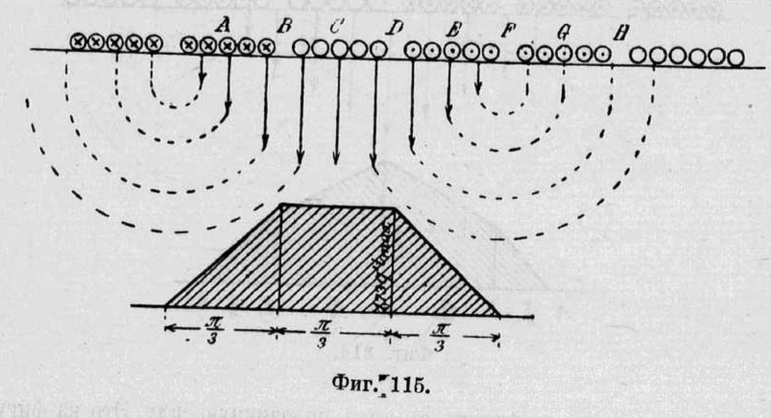
q' — число проволокъ на индуктирующуюся сторону катушки, т. е. число проволокъ на полюсъ и фазу,

то при A возбужденіе равно нулю,

» B » » $q' \cdot i_{max}$,

» D » » $\frac{q' \cdot i_{max}}{2} + q' \cdot i_{max} + \frac{q' \cdot i_{max}}{2} = 2 \cdot q' \cdot i_{max}$.

Отложимъ по оси абсциссъ окружность или, лучше, дугу, при чемъ дуга полнаго полюснаго дѣленія, понятно, опять равна π. Если, затѣмъ, возбужденія, имѣющіяся въ отдѣльныхъ мѣстахъ боковой поверхности, нанесемъ по оси ординатъ, то получимъ кривую, изображенную на фигурѣ внизу. Между A и B и между B и D увеличеніе возбужденія пропорціонально возрастанію дуги окружности. Кривая магнитнаго потока по очер-



Фиг. 115.

танію своему подобна кривой возбужденія. Среднее возбужденіе мы получимъ, если вычислимъ заштрихованную площадь и раздѣлимъ на основаніе π. Мы тогда получимъ при помощи обозначеній, указанныхъ на фиг. 314,

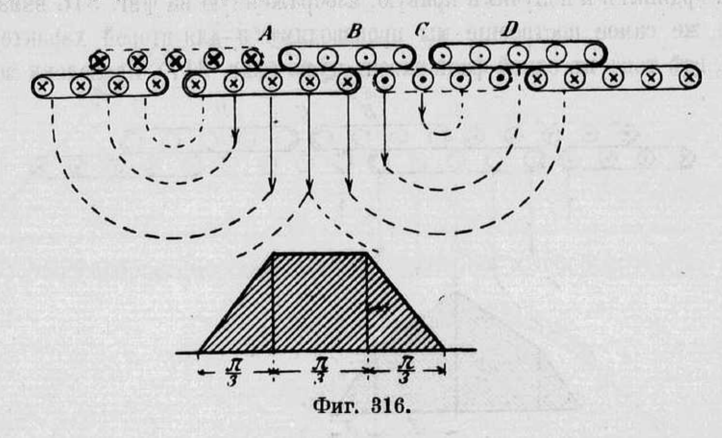
$$X_{среднее} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{6} \cdot q' \cdot i_{max} + 3 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot q' \cdot i_{max} \right) = 1{,}166 \cdot q' \cdot i_{max}.$$

Разсмотримъ теперь другую характерную точку, соотвѣтствующую тому моменту времени, въ который сила тока въ одной фазѣ равна нулю, въ то время какъ въ двухъ другихъ фазахъ она равна $i_{max} \cdot sin\, 60° = 0{,}866 \cdot i_{max}$ (фиг. 315). Теперь проволоки между D и H образуютъ одну общую индуктирующуюся сторону катушки съ числомъ ампервитковъ, равнымъ $2 \cdot q' \cdot 0{,}866 \cdot i_{ma} = 1{,}73 \cdot q' \cdot i_{max}$. Это возбужденіе имѣетъ мѣсто повсюду между B и D, что обозначено посредствомъ стрѣлокъ одинаковой длины

между B и D. Наоборотъ, вправо и влѣво отсюда возбужденіе будетъ ослабѣвать пропорціонально дугамъ. Если мы снова отложимъ по оси ординатъ возбужденія, дѣйствующія въ отдѣльныхъ точкахъ окружности, то получимъ кривую, изображенную въ нижней части фиг. 315. Опредѣливъ заштрихованную площадь и раздѣливъ ее на основаніе, мы получимъ среднее возбужденіе:

$$X_{среднее} = \frac{1}{\pi} \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot 1{,}73 \cdot q' \cdot i_{max} = 1{,}155 \cdot q' \cdot i_{max}.$$

Это почти та же величина, которую мы нашли въ первой характерной точкѣ, т. е. среднее возбужденіе и средняя плотность силовыхъ линій приблизительно постоянны. Возьмемъ среднюю ариѳметическую изъ обѣихъ найденныхъ величинъ, тогда получимъ:



Фиг. 316.

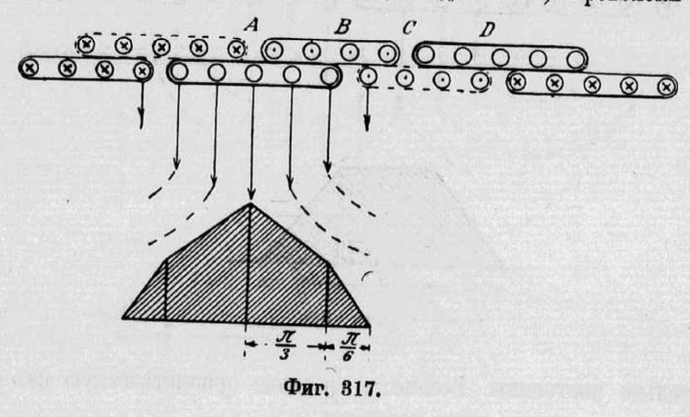
$$X_{среднее} = \frac{1{,}166 + 1{,}155}{2} \cdot q' \cdot i_{max} = 1{,}16 \cdot q' \cdot i_{max} \quad . \quad . \quad (a)$$

Магнитный потокъ пропорціоналенъ возбужденію. Слѣдовательно, вращающееся поле имѣетъ почти постоянный магнитный потокъ, въ то время какъ его наибольшая величина, согласно фиг. 314 и 315, колеблется въ отношеніи 2 : 1,73. Отсюда вытекаетъ преимущество двигателя трехфазнаго тока передъ двухфазнымъ, у котораго, согласно статьѣ 107, колебанія болѣе значительны.

Подобнымъ же образомъ, какъ при катушечной обмоткѣ, получается среднее возбужденіе и при обмоткѣ винтомъ. На фиг. 316 еще разъ изображена подобная обмотка винтомъ, при чемъ въ одной фазѣ токъ имѣетъ наибольшую свою силу, въ то время какъ въ двухъ другихъ фа-

захъ составляетъ $^1/_2 \cdot i_{max}$. Какъ легко видѣть, магнитныя дѣйствія проводниковъ между A и B взаимно уничтожаютъ другъ друга. Мы имѣемъ, слѣдовательно, здѣсь равномѣрно напряженное поле, создаваемое ампервитками, расположенными между B и D. Число этихъ амперимтковъ равно $q' \cdot i_{max} + 2 \cdot \frac{q'}{2} \cdot \frac{i_{max}}{2} = 1{,}5 \cdot q' \cdot i_{max}$. Если мы снова предположимъ большое число каналовъ на индуктирующуюся сторону катушки, то число дѣйствующихъ амперимтковъ отъ B уменьшается пропорціонально дугѣ до нуля. Это значеніе имѣетъ мѣсто между точками B и D, гдѣ сѣверный полюсъ переходитъ въ южный. Мы снова отложимъ дѣйствующіе амперимтки по оси ординатъ и получимъ кривую, изображенную на фиг. 316 внизу.

То же самое построеніе мы производимъ и для второй характерной точки, гдѣ токъ въ одной фазѣ равенъ нулю (фиг. 317). Проволоки между



Фиг. 317.

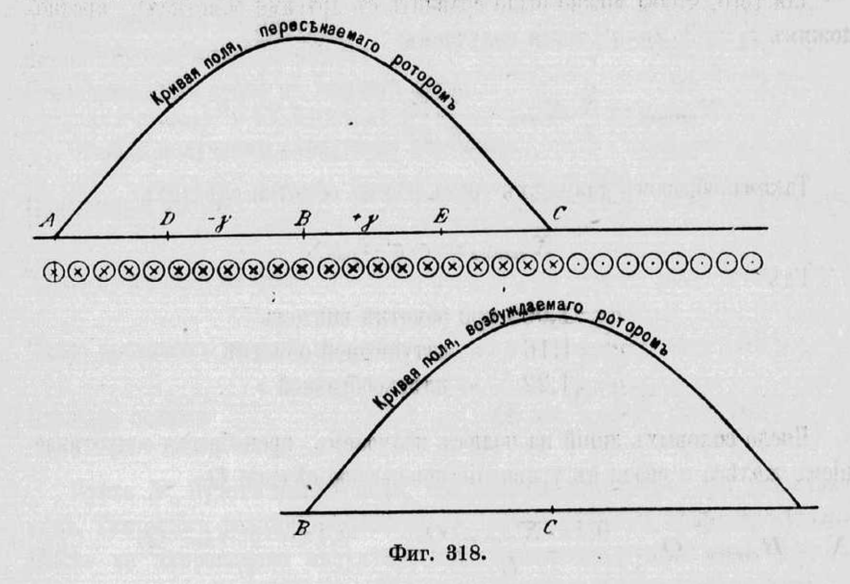
A и D образуютъ теперь общую индуктирующуюся сторону катушки, въ серединѣ которой напряженіе поля равно нулю. По обѣ стороны отъ этой послѣдней напряженіе возрастаетъ пропорціонально дугѣ окружности якоря. При B оно соотвѣтствуетъ амперимткамъ, заключеннымъ между B и C, т. е. величинѣ $2 \cdot \frac{q'}{2} \cdot i_{max} \cdot sin 60° = 0{,}866 \cdot q' \cdot i_{max}$. Отъ B до D напряженіе поля также еще возрастаетъ, но медленнѣе. Наконецъ, при A оно соотвѣтствуетъ всѣмъ амперимткамъ, расположеннымъ между A и D, слѣдовательно, величинѣ $2 \cdot q' \cdot i_{max} \cdot sin 60° = 1{,}73 \cdot q' \cdot i_{max}$. Середина создаваемаго магнитнаго потока, по сравненію съ фиг. 316, сдвинута на $\frac{\pi}{6}$.

Сравнимъ, теперь, площади на фиг. 316 и 317 съ подобными же площадями на фиг. 314 и 315, тогда увидимъ, что обѣ площади въ обѣихъ

характерныхъ точкахъ измѣнили свою роль. Но ординаты полученныхъ теперь площадей въ 0,866 раза меньше, чѣмъ прежде; поэтому, принимая во вниманіе уравненіе (а), получаемъ среднее возбужденіе:

$$X_{среднее} = 0{,}866 \cdot 1{,}16 \cdot q' \cdot i_{max} = 1{,}005 \cdot q' \cdot i_{max}.$$

Опредѣлимъ теперь возбужденіе, создаваемое при клѣткообразной обмоткѣ ротора. Верхняя кривая на фиг. 318 представляетъ кривую пересѣкающаго роторъ поля, которое измѣняется вдоль окружности по закону синусоиды. Электродвижущая сила, индиктируемая въ отдѣльныхъ проволокахъ ротора, и токъ въ роторѣ i_2 точно также синусоидальныя функціи



Фиг. 318.

положенія. Это на фиг. 318 обозначено посредствомъ соотвѣтствующихъ жирно очерченныхъ крестиковъ и точекъ, разставленныхъ на проволокахъ ротора.

Возбужденіе, создаваемое роторомъ, въ точкѣ B равно нулю, и затѣмъ вправо и влѣво растетъ до нѣкотораго своего наибольшаго значенія, которое достигается имъ въ точкахъ A и C.

Для того, чтобы доказать, что кривая возбужденія, создаваемаго роторомъ, также является синусоидой, опредѣлимъ число амперимтковъ, приходящихся, напримѣръ, между D и E. На дугѣ $d\alpha$, отстоящей на разстояніи α отъ B, располагается $\frac{z_2}{2p} \cdot \frac{d\alpha}{\pi}$ проволокъ, и сила тока въ этомъ мѣ-

стѣ будетъ $i_{max} \cdot \cos\alpha$. Поэтому число ампервитковъ между D и E будетъ:

$$X_{-\gamma}^{+\gamma} = \int_{-\gamma}^{+\gamma} i_{max} \cdot \cos\alpha \cdot \frac{z_2}{2p} \cdot \frac{d\alpha}{\pi} = \frac{z_2}{p \cdot \pi} \cdot i_{max} \cdot \sin\gamma.$$

Возбужденіе вдоль по периферіи измѣняется пропорціонально синусу угла γ. Положимъ $\gamma = 90^\circ$, тогда получимъ наибольшее значеніе создаваемаго роторомъ возбужденія X^{max}. Если умножимъ это послѣднее на $\frac{2}{\pi}$, то, согласно стр. 306, получимъ среднее возбужденіе.

Для того, чтобы можно было сравнить съ другими обмотками, предположимъ $z_2 = 3 \cdot 2p \cdot q'$; тогда получаемъ:

$$X_{среднее} = \frac{2}{\pi} \cdot X_{max} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{z_2}{p\pi} \cdot i_{max} = 1{,}22\ q' \cdot i_{max}.$$

Такимъ образомъ для всѣхъ трехъ родовъ обмотки слѣдуетъ:

$$X_{среднее} = c \cdot q' \cdot i_{max}.$$

Гдѣ

$c = 1{,}005$ при обмоткѣ винтомъ
$c = 1{,}16$ » катушечной обмоткѣ
$c = 1{,}22$ » клѣткообразной » .

Число силовыхъ линій на полюсъ получаемъ, пренебрегая сопротивленіемъ желѣза и вводя въ уравненіе поперечное сѣченіе Q_l.

$$N = B_{среднее} \cdot Q_l = \frac{0{,}4\pi \cdot X_{среднее} \cdot Q_l}{l_l} = \frac{0{,}4\pi \cdot c \cdot q' \cdot i_{max} \cdot Q_l}{l_l} \dots (69).$$

По сравненіи видимъ, что коэффиціентъ c почти пропорціоналенъ соотвѣтствующимъ значеніямъ множителя k статьи 89. Для клѣткообразной и однослойной обмотки винтомъ необходимо ширину индуктирующейся стороны катушки брать равной нулю.

115. Вліяніе сопротивленія желѣза.

Двигатель въ 150 PS фирмы Эрликонъ послужитъ намъ для повѣрки выведенныхъ нами до сихъ поръ формулъ. Данныя для этого слѣдующія [1]):

Главное напряженіе у зажимовъ	$e =$	3 300 вольтъ.
Число періодовъ въ первичной цѣпи	$\sim_1 =$	50
Число паръ полюсовъ	$p =$	6
Длина якоря (вдоль оси)	$b =$	23,5 см.
Діаметръ якоря	$D =$	90 »
Двойное междужелѣзное пространство	$l_l =$	0,15 »
Число проволокъ статора	$z_1 =$	2 016
Длина статора и ротора вмѣстѣ	$=$	6 »
Отношеніе шага зубца въ ширинѣ зубца	$=$	2,5.

Отсюда получаемъ слѣдующія величины:

Напряженіе на фазу	$e_1 = \frac{3\,300}{\sqrt{3}}$	$= 1\,910$ вольтъ.
Число проволокъ на фазу	$z'_1 = \frac{z_1}{3}$	$=$ 672
Число проволокъ на фазу и полюсъ	$q' = \frac{z_1}{3 \cdot 2p}$	$=$ 56
Площадь полюса	$Q_l = \frac{D \cdot \pi \cdot b}{2p}$	$=$ 763

Пусть N_0 будетъ полное поле, создаваемое статоромъ при холостомъ ходѣ. Такъ какъ фазовое напряженіе e_1 почти равно и прямо противоположно по направленію индуктируемой электродвижущей силѣ E_1, то, согласно уравненію (56), стр. 383, при синусоидальномъ полѣ имѣемъ:

$$e_1 = E_1 = 2{,}12 \cdot N_0 \sim_1 \cdot z_1' \cdot 10^{-8}.$$

Отсюда

$$N_0 = \frac{e_1 \cdot 10^8}{2{,}12 \cdot \sim_1 \cdot z_1'} = \frac{1\,910 \cdot 10^8}{2{,}12 \cdot 50 \cdot 672} = 2{,}69 \cdot 10^6.$$

Примемъ, что 2°/₀ этого потока разсѣивается, тогда на роторъ будутъ падать 98°/₀, и магнитный потокъ N, пересѣкающій роторъ, будетъ:

$$N = 0{,}98 \cdot N_0 = 2{,}64 \cdot 10^6.$$

---

[1]) Данныя взяты изъ Arnold, «Konstruktionstafeln für den Dynamomaschinenbau».

Съ другой стороны, согласно стр. 492:

$$N = \frac{0{,}4\pi \cdot c \cdot q' \cdot i_{max}}{l_l} \cdot Q_l \, .$$

Для катушечной обмотки, согласно предыдущей статьѣ, множитель c равенъ 1,16, и мы получаемъ, введя сюда дѣйствующее значенiе тока при холостомъ ходѣ $i_0 = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}}$,

$$i_0 = \frac{N \cdot l_l}{\sqrt{2} \cdot 0{,}4 \cdot \pi \cdot c \cdot q' \cdot Q_l} = 4{,}5 \text{ ампера.}$$

Этотъ намагничивающiй токъ былъ бы необходимъ при холостомъ ходѣ, если бы магнитное сопротивленiе желѣза равнялось нулю. На самомъ же дѣлѣ для этого двигателя токъ при холостомъ ходѣ указанъ въ 6 амперъ, т. е. на 33% больше, чѣмъ полученный нами теоретически.

Теперь примемъ во вниманiе сопротивленiе желѣза. Для этого сначала вычертимъ такъ называемую характеристику двигателя, которая для каждой индукцiи въ междужелѣзномъ пространствѣ даетъ соотвѣтствующее возбужденiе. И наоборотъ, изъ той же кривой находятъ для каждаго возбужденiя, дѣйствующаго вдоль по окружности, соотвѣтствующую плотность магнитнаго потока. Для этой цѣли для междужелѣзнаго пространства выбираютъ какую-либо индукцiю B_l и опредѣляютъ число необходимыхъ для воздушнаго слоя ампервитковъ изъ уравненiя:

$$X_l = 0{,}8 \cdot B_l \cdot l_l$$

или, такъ какъ въ нашемъ случаѣ $l_l = 0{,}15$, то

$$X_l = 0{,}8 \cdot B_l \cdot 0{,}15 = 0{,}12 \cdot B_l .$$

Затѣмъ по индукцiи въ воздушномъ слоѣ и отношенiю поперечныхъ сѣченiй опредѣляютъ индукцiю въ зубцахъ въ данномъ опредѣленномъ мѣстѣ. Это отношенiе въ нашемъ примѣрѣ равно 2,95. Слѣдовательно, мы имѣемъ:

$$B_z = 2{,}95 \cdot B_l .$$

Число ампервитковъ на сантим. пути силовыхъ линiй, соотвѣтствующее B_z, получаемъ изъ кривой намагничиванiя для листового желѣза на фиг. 319. Тогда имѣемъ:

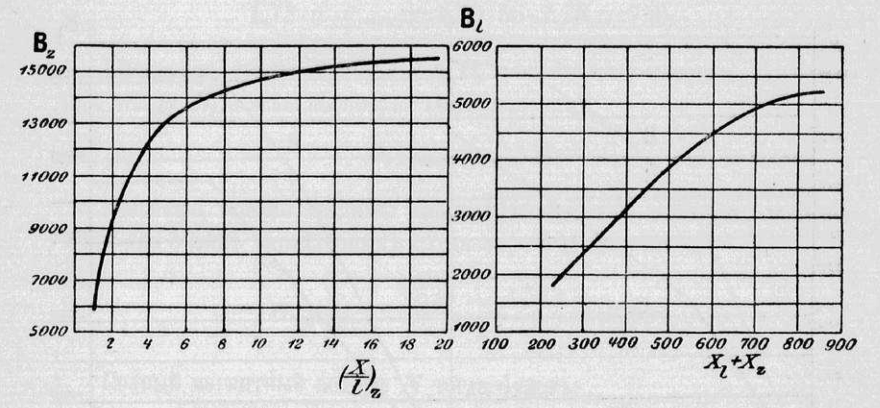
$$X_z = \left(\frac{X}{l}\right)_z \cdot l_z .$$

При этомъ для l_z надо брать двойную длину зубцовъ. Слѣдовательно, въ нашемъ случаѣ получаемъ:

$$X_z = \left(\frac{X}{l}\right)_z \cdot 2 \cdot 6 = 12 \cdot \left(\frac{X}{l}\right)_z .$$

Сумма X_l и X_z представитъ намъ тогда необходимое для данной индукцiи дѣйствующее возбужденiе X.

Подобнаго рода расчетъ сдѣланъ для величинъ отъ $B_l = 2\,000$ до $B_l = 5\,200$ и результаты представлены въ слѣдующей таблицѣ:



Фиг. 319. Фиг. 320.

B_l	$X_l = 0{,}12 \cdot B_l$	$B_z = 2{,}95 \cdot B_l$	$\left(\frac{X}{l}\right)_z$	$X_z = 12 \cdot \left(\frac{X}{l}\right)_z$	$X_l + X_z$
2 000	240	5 900	1,1	13	253
3 000	360	8 850	1,9	23	383
4 000	480	11 800	3,6	43	523
4 500	540	13 300	5,4	65	605
5 000	600	14 800	10,7	128	728
5 200	624	15 300	18,5	222	850

Мы нанесемъ, теперь, величины $X_l + X_z$ по оси абсциссъ, а индукцiю въ воздушномъ слоѣ B_l по оси ординатъ; тогда получимъ кривую фиг. 320.

Выберемъ, теперь, намагничивающiй токъ больше получающагося теоретически, т. е. возьмемъ его равнымъ:

$$i_0 = 5{,}5 \text{ ампера.}$$

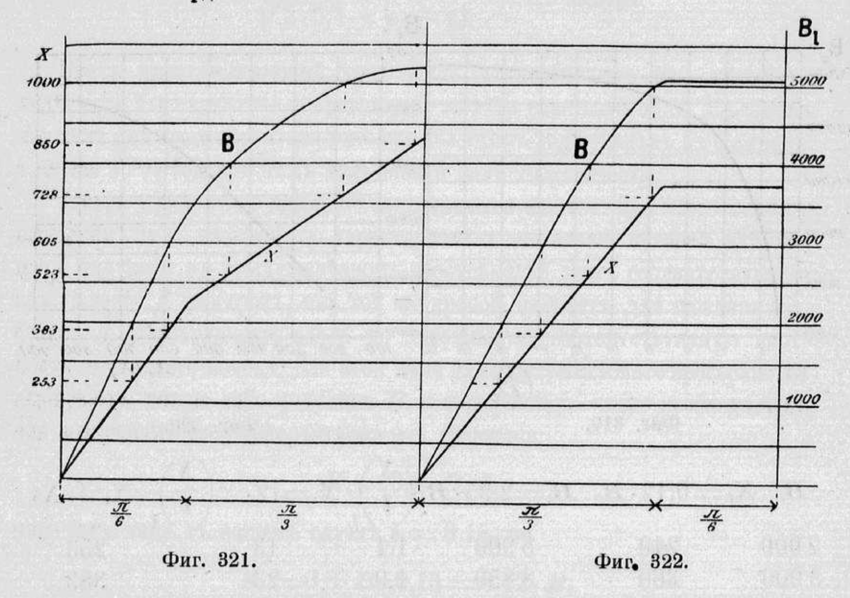
Тогда получимъ:

$$i_{0\,max} = \sqrt{2} \cdot i_0 = 7{,}78 \text{ ампера.}$$

Отложимъ, теперь, окружность по оси абсциссъ, а дѣйствующее въ данномъ мѣстѣ возбужденіе по оси ординатъ; тогда получимъ кривую X фиг. 321, которая соотвѣтствуетъ первому характерному случаю, разсмотрѣнному на фиг. 314. Для абсциссы, равной $\pi/2$, мы получаемъ наибольшую ординату:

$$2 \cdot q' \cdot i_{0\,max} = 2 \cdot 56 \cdot 7{,}78 = 870.$$

Наоборотъ, для абсциссы, равной $\pi/6$, дѣйствующее возбужденіе будетъ составлять половину наибольшаго. Масштабъ для возбужденія представленъ слѣва на оси ординатъ.



Фиг. 321. Фиг. 322.

Затѣмъ станемъ откладывать отъ O по оси ординатъ величины, взятыя изъ характеристики фиг. 320 или изъ вышеуказанной таблицы:

$$X = X_l + X_z = 253, \quad 383, \quad 523, \quad 605, \quad 728, \quad 850$$

и черезъ точки проведемъ прямыя, параллельныя оси абсциссъ. Въ точкахъ пересѣченія этихъ параллельныхъ прямыхъ съ кривою X мы откладываемъ ординаты, длина которыхъ послѣдовательно будетъ соотвѣтствовать:

$$B_l = 2\,000, \quad 3\,000, \quad 4\,000, \quad 4\,500, \quad 5\,000, \quad 5\,200.$$

Масштабъ для B_l взятъ произвольный и указанъ справа на фиг. 322. Кривая, соединяющая концѣ этихъ ординатъ, является искомой кривой

поля при токѣ силою въ 5,5 ампера. Площадь, ограниченную этою кривою и осью абсциссъ, необходимо вычислить по правилу Симпсона и раздѣлить на основаніе. Тогда получимъ среднее напряженіе поля при намагничивающемъ токѣ въ 5,5 ампера:

$$B_{среднее} = 3\,635.$$

Это же построеніе произведено и для второго характернаго случая на фиг. 322, и при этомъ наибольшая ордината кривой X, согласно фиг. 315, будетъ:

$$1{,}73 \cdot q' \cdot i_{0\,max} = 1{,}73 \cdot 56 \cdot 7{,}78 = 750.$$

Вычертимъ, теперь, кривую X и B_l и опредѣлимъ площадь, заключенную между B_l и осью абсциссъ. Тогда получимъ:

$$B_{l\ среднее} = 3\,583.$$

Возьмемъ, теперь, среднюю ариѳметическую изъ величинъ, полученныхъ для обоихъ характерныхъ случаевъ, тогда получимъ:

$$B_{l\ среднее} = \frac{3\,635 + 3\,583}{2} = 3\,609.$$

Полный магнитный потокъ N тогда будетъ:

$$N = B_{l\ среднее} \cdot Q_l = 3\,609 \cdot 763 = 2{,}75 \cdot 10^6.$$

Эта величина находится столь близко отъ желаемаго нами размѣра въ $2{,}64 \cdot 10^6$ силовыхъ линій, что мы можемъ принять пропорціональность между силою тока и числомъ силовыхъ линій. Слѣдовательно, намагничивающій токъ, потребный для созданія магнитнаго потока въ $2{,}64 \cdot 10^6$ силовыхъ линій, будетъ:

$$i_0 = \frac{5{,}5 \cdot 2{,}64 \cdot 10^6}{2{,}75 \cdot 10^6} = 5{,}3 \text{ ампера.}$$

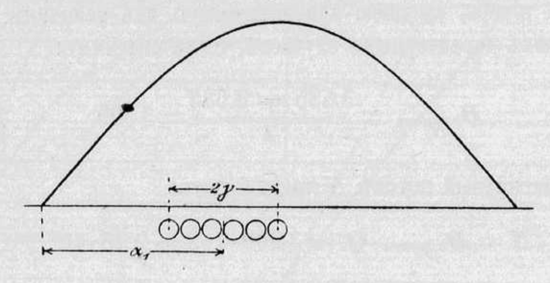
При этомъ еще не принято во вниманіе сопротивленіе сердечниковъ ротора и статора. Кромѣ того здѣсь необходимо принять во вниманіе уменьшеніе, вслѣдствіе зубцовъ, поперечнаго сѣченія междужелѣзнаго пространства, черезъ которое проходятъ силовыя линіи. Насъ не должно смущать, что получаемый по расчету токъ при холостой работѣ $i_0 = 5{,}3$ ампера меньше еще на 10% тока, получаемаго непосредственнымъ измѣреніемъ и равнаго 6 амперамъ.

116. Вращающій моментъ трехфазнаго двигателя.

Для опредѣленія вращающаго момента трехфазнаго двигателя положимъ, что вращающееся поле замѣнено синусоидальнымъ полемъ съ тѣмъ же числомъ силовыхъ линій. Разсмотримъ, теперь, индуктирующуюся сторону катушки многофазнаго ротора, ширина которой снова, какъ раньше, равна 2γ и середина которой отстоитъ отъ нейтральной линіи на разстояніи α_1 (фиг. 323). Мы знаемъ уже изъ статьи 89, что индуктируемая въ этой индуктирующейся сторонѣ катушки электродвижущая сила, а слѣдовательно, и токъ въ роторѣ пропорціональны синусу угла α_1 [1]). Слѣдовательно, мгновенное значеніе тока въ роторѣ будетъ:

$$i_2 = i_{2max} \cdot sin \alpha_1.$$

Этотъ токъ идетъ по всѣмъ проволокамъ индуктирующейся стороны катушки, но отдѣльныя проволоки располагаются въ полѣ неодинаковаго



Фиг. 323.

напряженія. Слѣдовательно, для того, чтобы найти вращающій моментъ въ данное мгновеніе, необходимо знать средній магнитный потокъ вдоль дуги 2γ. Вообще напряженіе поля въ любой точкѣ, отстоящей отъ нейтральной линіи на разстояніи α, равно $\boldsymbol{B}_{max} \cdot sin\ \alpha$. Слѣдовательно, среднее напряженіе поля вдоль дуги 2γ будетъ:

$$\boldsymbol{B} = \frac{1}{2\gamma} \int\limits_{\alpha_1-\gamma}^{\alpha_1+\gamma} \boldsymbol{B}_{max} \cdot sin\alpha \cdot d\alpha = \boldsymbol{B}_{max} \cdot \frac{sin\gamma}{\gamma} \cdot sin\ \alpha_1.$$

[1]) Между электродвижущей силой, создаваемой разсматриваемымъ силовымъ потокомъ, и токомъ въ роторѣ не имѣется никакого сдвига фазъ, такъ какъ силовой потокъ, создаваемый совмѣстно токами статора и ротора заключаетъ уже въ себѣ самоиндукцію ротора.

Для опредѣленія вращающаго момента въ данное мгновеніе составляемъ произведенія изъ мгновенной силы тока на мгновенное среднее значеніе индукціи и получаемъ:

$$i_2 \cdot \boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}_{max} \cdot i_{2max} \cdot \frac{sin\gamma}{\gamma} \cdot sin^2\alpha_1.$$

При этомъ i_2 означаетъ мгновенное значеніе тока и $\boldsymbol{B}$ среднее значеніе напряженія поля надъ индуктирующейся стороной катушки въ данное мгновеніе.

Индуктирующаяся сторона катушки постоянно перемѣщается въ другое мѣсто поля, т. е. уголъ α_1 измѣняется между 0 и 360°. Такъ какъ мгновенное значеніе произведенія $i_2 \cdot \boldsymbol{B}$ находится въ зависимости отъ квадрата $sin\alpha_1$, то среднее значеніе произведенія $i_2 \cdot \boldsymbol{B}$ получается подобно средней мощности въ статьѣ 71. Мы получимъ, какъ на стр. 307, среднее значеніе за весь періодъ:

$$(\boldsymbol{B} \cdot i_2)_{среднее} = \frac{\boldsymbol{B}_{max} \cdot i_{2\,max}}{2} \cdot \frac{sin\,\gamma}{\gamma}.$$

Если мы пожелаемъ имѣть вращающую силу въ динахъ, мы должны силу тока выразить въ абсолютныхъ единицахъ (1 амперъ $= \frac{1}{10}\ cgs$). Согласно ст. 27, мы должны тогда произведеніе изъ напряженія поля и силы тока умножить на полную длину проводниковъ ротора, т. е. на $z_2 \cdot \boldsymbol{b}$. Тогда, принимая во вниманіе вышеуказанное значеніе для $(\boldsymbol{B} \cdot i_2)_{среднее}$, получаемъ:

$$\boldsymbol{f} = \frac{\boldsymbol{B}_{max} \cdot i_{2\,max}}{2 \cdot 10} \cdot \frac{sin\,\gamma}{\gamma} \cdot z_2 \cdot \boldsymbol{b} \text{ динъ.}$$

Намъ необходимо, теперь, знать еще плечо, на которое данная сила дѣйствуетъ, т. е. радіусъ ротора $\boldsymbol{r}$ въ сант. Для этой цѣли полагаемъ боковую поверхность ротора равною произведенію изъ поверхности полюса на число полюсовъ:

$$2\,\boldsymbol{r}\,\pi \cdot \boldsymbol{b} = 2p \cdot \boldsymbol{Q}_l.$$

Отсюда опредѣляемъ:

$$\boldsymbol{r} = \frac{p \cdot \boldsymbol{Q}_l}{\pi \cdot \boldsymbol{b}}.$$

Для того, чтобы получить вращающій моментъ въ клг-мтр, необходимо произведеніе $\boldsymbol{f} \cdot \boldsymbol{r}$ раздѣлить на $981\,000 \cdot 100$ и тогда, полагая, что $\frac{2}{\pi} \cdot \boldsymbol{B}_{max} = \boldsymbol{B}_{среднее}$, отсюда $\frac{2}{\pi} \cdot \boldsymbol{B}_{max} \cdot \boldsymbol{Q}_l = \boldsymbol{N}$ и $i_{2\,max} = \sqrt{2} \cdot i_2$, гдѣ i_2 означаетъ дѣйствующее значеніе тока, получаемъ:

$$M_d = 3{,}6 \cdot p \cdot N \cdot z_2 \cdot i_2 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{\sin\gamma}{\gamma} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (70)$$

При этомъ ширина 2γ для клѣткообразной обмотки равна нулю, для катушечной составляетъ $\pi/3$ и для обмотки винтомъ будетъ $2/3\pi$.

Коэффиціенты k для электродвижущихъ силъ въ ст. 89 опредѣляются также при помощи множителя $\frac{\sin\gamma}{\gamma}$. Слѣдовательно, при различныхъ обмоткахъ ротора, вращающіе моменты относятся между собою, какъ коэффиціенты k индуктируемыхъ въ роторѣ электродвижущихъ силъ.

Этотъ результатъ можно получить и непосредственно, если предположить, что роторъ заторможенъ, такимъ образомъ вся передаваемая мощность или въ самомъ роторѣ, или во включенномъ до него сопротивленіи превращается въ тепло Джоуля. Пусть N будетъ дѣйствительно существующее поле въ роторѣ, создаваемое совмѣстнымъ дѣйствіемъ токовъ ротора и статора. Это поле пересѣкаетъ при заторможеніи ротора при первичномъ числѣ періодовъ $\sim_1 = p \cdot \frac{n_1}{60}$ проволоки ротора, гдѣ n_1 есть число оборотовъ вращающагося поля. При этомъ въ роторѣ индуктируется электродвижущая сила E_2, имѣющая одинаковую фазу съ токомъ въ роторѣ и опредѣляемая согласно ст. 89. Если, теперь, z_2 полное число проволокъ въ роторѣ, то мощность, прилагаемая къ ротору во всѣхъ трехъ фазахъ, будетъ:

$$P_2 = 3 \cdot E_2 \cdot i_2 = \cdot 3 \cdot k \cdot N \cdot \sim_1 \cdot z_2{}' \cdot 10^{-8} \cdot i_2 = k \cdot N \cdot \sim_1 \cdot z_2 \cdot 10^{-8} \cdot i_2 \cdot (71)$$

Эта мощность будетъ передаваться ротору при помощи синусоидальнаго, по нашему предположенію, силового потока, вращающагося съ механическою угловою скоростью [1])

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{n_1}{60} = 2\pi \cdot \frac{\sim_1}{p}.$$

Мощность же въ клг-мтр въ секунду равна произведенію изъ вращающаго момента на угловую скорость. Если мы пожелаемъ имѣть мощность въ ваттахъ, то должны умножить еще на 9,81. Стало быть получаемъ:

$$P_2 = M_d \cdot \omega \cdot 9{,}81.$$

[1]) Въ этомъ случаѣ мы должны положить механическую угловую скорость равною $\omega = 2\pi \cdot \frac{n_1}{60}$, въ то время, какъ обыкновенно подъ ω мы понимали выраженіе $2\pi \cdot \sim_1 = 2\pi \cdot p \cdot \frac{n_1}{60}$.

Опредѣлимъ отсюда M_d и подставимъ вышеуказанныя значенія для P_2 и ω, тогда получимъ:

$$M_d = \frac{k \cdot p \cdot N \cdot z_2 \cdot i_2 \cdot 10^{-8}}{2\pi \cdot 9{,}81}.$$

При этомъ безразлично, будетъ ли роторъ вращаться, или будетъ заторможенъ неподвижно, лишь бы значенія N и i_2 оставались безъ измѣненія. Подставимъ, теперь, значенія k, указанныя на стр. 381 и 383, тогда для вращающаго момента при различныхъ обмоткахъ будемъ имѣть ранѣе полученныя величины, и это можетъ служить подтвержденіемъ достовѣрности нашего расчета.

Теперь намъ остается сравнить еще вращающій моментъ двигателя трехфазнаго тока съ вращающимъ моментомъ двигателя постояннаго тока, и для этой цѣли возьмемъ двигатель съ клѣткообразной обмоткой. Для двигателя постояннаго тока мы имѣли, согласно уравненію (42), стр. 261:

$$M_d = \frac{p \cdot N \cdot z \cdot i_a \cdot 10^{-8}}{a \cdot 2\pi \cdot 9{,}81} = 3{,}25 \cdot p \cdot N \cdot z \cdot \frac{i_a}{2a} \cdot 10^{-10}.$$

При этомъ $i_a/2a$ представляетъ силу тока на проводникъ якоря.

Для клѣткообразной обмотки мы изъ уравненія (70) получаемъ коэффиціентъ 3,6, такъ какъ ширина индуктирующейся стороны катушки безконечно мала, т. е. величина $\frac{\sin\gamma}{\gamma} = 1$. Слѣдовательно, вращающій моментъ двигателя трехфазнаго тока при одинаковыхъ условіяхъ при клѣткообразной обмоткѣ на $10^0/_0$ больше, чѣмъ при двигателѣ постояннаго тока.

117. Опредѣленіе скольженія.

Какъ мы видѣли уже въ статьѣ 112, абсолютно ненагруженный роторъ вращается синхронно съ полемъ, т. е. съ числомъ оборотовъ

$$n_1 = \frac{\sim_1 \cdot 60}{p},$$

и число оборотовъ при нагрузкѣ становится настолько меньше числа оборотовъ n_1 вращающагося поля, что, благодаря пересѣченію магнитнаго потока, въ роторѣ образуется достаточная электродвижущая сила E_2. Вслѣдствіе этого въ роторѣ получается токъ, который, согласно уравненіямъ предыдущей статьи, даетъ потребный вращающій моментъ.

Скольженіе или число періодовъ $\sim$, при которомъ проводники ротора

пересѣкаются, соотвѣтствуетъ тогда разности чиселъ оборотовъ поля и ротора:

$$s = \frac{n_1 - n}{60} \cdot p.$$

Этому скольженію соотвѣтствуетъ незначительная индуктируемая въ проволокахъ ротора электродвижущая сила E_2, которая опредѣляется согласно извѣстному уже намъ уравненію:

$$E_2 = k \cdot \boldsymbol{N} \cdot s \cdot z_2' \cdot 10^{-8}.$$

Здѣсь подъ $\boldsymbol{N}$ мы подразумѣваемъ дѣйствительное, пересѣкающее роторъ поле, которое получается отъ взаимодѣйствія токовъ статора и ротора. Отсюда слѣдуетъ,—на что указывалось уже не разъ,—что между электродвижущей силой E_2 и токомъ въ роторѣ i_2 не существуетъ сдвига фазъ. Слѣдовательно, если w_2 обозначаетъ сопротивленіе ротора на фазу, то имѣемъ:

$$E_2 = i_2 \cdot w_2.$$

Тогда энергія, превращаемая въ роторѣ въ тепло Джоуля, во всѣхъ трехъ фазахъ вмѣстѣ, будетъ:

$$3 \cdot i_2^2 \cdot w_2 = 3 \cdot E_2 \cdot i_2 = k \cdot \boldsymbol{N} \cdot s \cdot z_2 \cdot 10^{-8} \cdot i_2.$$

Здѣсь z_2 подставлено вмѣсто $3 \cdot z_2'$. Воспользовавшись уравненіемъ (71) получаемъ:

$$\frac{3 \cdot i_2^2 \cdot w_2}{P_2} = \frac{s}{s_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (72)$$

Слѣдовательно, процентъ потерь въ роторѣ равенъ проценту скольженія. Поэтому теперь ясно, почему двигатели строятъ постоянно такимъ образомъ, чтобы скольженіе составляло только незначительный процентъ. Далѣе ясно, что у якоря съ клѣткообразной обмоткой скольженіе можно уменьшать просто тѣмъ, что увеличивать сопротивленіе обтачиваніемъ лобовыхъ колецъ.

Очень интересно сравнить такую работу трехфазнаго двигателя съ работой шунтового двигателя. Для этого послѣдняго имѣемъ:

$$e \cdot i_a = \boldsymbol{E} \cdot i_a + i_a^2 \cdot w_a.$$

Въ этомъ уравненіи $e \cdot i_a$ есть энергія, сообщаемая якорю, тогда какъ $E \cdot i_a$—энергія, превращаемая въ механическую мощность. Обѣ энергіи

относятся между собою, какъ e къ E, т. е. какъ число оборотовъ n_0 при абсолютно холостомъ ходѣ къ числу оборотовъ n при нагрузкѣ:

$$\frac{E \cdot i_a}{e \cdot i_a} = \frac{n}{n_0}.$$

Преобразуя данное уравненіе, получаемъ:

$$\frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{e \cdot i_a - E \cdot i_a}{e \cdot i_a} = \frac{i_a^2 \cdot w_a}{e \cdot i_a}.$$

Слѣдовательно, процентъ потери числа оборотовъ при работѣ по сравненію съ числомъ оборотовъ при холостомъ ходѣ въ шунтовомъ двигателѣ также равенъ проценту потери энергіи въ якорѣ.

Разсмотримъ, теперь, случай, когда скольженіе составляетъ 100%, какъ это бываетъ при пускѣ въ ходъ. При этомъ почти весь силовой потокъ, противодѣйствіемъ тока въ роторѣ, разсѣивается. Незначительная остающаяся часть пересѣкается при большомъ числѣ періодовъ s_1 проволоками ротора и индуктируетъ въ нихъ чрезвычайно большую электродвижущую силу. Токъ въ роторѣ (и соотвѣтственно въ статорѣ) получается при этомъ настолько сильнымъ, что либо портитъ во многихъ случаяхъ роторъ, либо, вслѣдствіе такого чрезвычайно большого внезапнаго развитія тока, нарушаетъ правильную работу. Поэтому короткозамкнутые якоря можно вообще примѣнять только при небольшихъ двигателяхъ, или при этомъ необходимо включать въ сѣть статора пусковые реостаты, чтобы сильнымъ внезапнымъ расходомъ тока не попортить сосѣднія лампы. Короткозамкнутые якоря примѣняются также тамъ, гдѣ двигатели возможно до включенія приводить къ нормальному числу оборотовъ, или гдѣ можно одновременно съ двигателемъ пускать въ ходъ и генераторъ.

Во всѣхъ другихъ случаяхъ необходимо примѣнять фазовой якорь, и токъ въ роторѣ въ моментъ пуска въ ходъ ослаблять посредствомъ пусковыхъ реостатовъ, включенныхъ въ цѣпь ротора. Такіе фазовые якоря, конечно, одинаково возможны какъ съ соединеніемъ треугольникомъ, такъ и съ соединеніемъ звѣздой. Обыкновенное соединеніе треугольникомъ является замкнутымъ уже какъ бы въ силу конструкціи; но необходимо, подобно генератору, считать соединеніе электрически незамкнутымъ, пока три вершины этого треугольника не соединимъ посредствомъ внѣшняго пускового реостата или короткимъ замыканіемъ контактныхъ колецъ. Пусковые реостаты, понятно, лучше всего устанавливаются при соединеніи звѣздой.

Въ качествѣ пусковыхъ реостатовъ часто употребляются жидкіе реостаты, у которыхъ уменьшеніе сопротивленія достигается болѣе глубокимъ

погруженіемъ электродовъ. Къ тому же необходимо указать на то, что пусковые реостаты въ цѣпи ротора служатъ не только для того, чтобы ослабить токъ при пускѣ въ ходъ, но также и для того, чтобы повысить вращающій моментъ при троганіи съ мѣста (см. ст. 122).

Уравненіе (72) указываетъ на то, что посредствомъ включенія въ цѣпь ротора сопротивленія можно увеличить скольженіе, стало быть, уменьшить число оборотовъ. Но при этомъ, подобно тому, какъ у шунтовыхъ двигателей съ добавочнымъ сопротивленіемъ, потеря энергіи будетъ значительна. Кромѣ того, тогда при каждомъ измѣненіи нагрузки сильно колеблется число оборотовъ. Переключеніе обмотки статора на различное число полюсовъ возможно, но очень хлопотливо. Иногда роторъ двигателя заставляють работать не на добавочное сопротивленіе, а на статоръ другого двигателя и такимъ образомъ понижаютъ число оборотовъ приблизительно въ отношеніи 1 : 2 (каскадное соединеніе). Однако, почти постоянное число оборотовъ при обыкновенныхъ условіяхъ дѣлаетъ трехфазный двигатель непригоднымъ для нѣкоторыхъ цѣлей.

Особенный интересъ представляетъ собою изслѣдованіе заторможеннаго фазового якоря, въ цѣпь ротора котораго включено сопротивленіе. Вся мощность, передаваемая заторможенному ротору, превратится тогда въ якорѣ и добавочномъ сопротивленіи въ тепло Джоуля и двигатель станетъ работать, какъ трансформаторъ. При одинаковыхъ силахъ тока полная мощность въ цѣпи ротора такова же, что и мощность, передаваемая на вращающійся якорь во время работы. Измѣренная энергія, пошедшая на тепло Джоуля при затормаживаніи, можетъ, слѣдовательно, очень удобно служить средствомъ для опредѣленія механической мощности, которую далъ бы двигатель при томъ же токѣ во время работы. Въ то же время и пониманіе трехфазнаго двигателя сильно облегчается, если разсматривать его какъ трансформаторъ, къ которому приложимы всѣ раньше указанныя свойства обыкновеннаго трансформатора. То обстоятельство, что силовое поле у обыкновеннаго трансформатора колеблющееся, а у двигателя трехфазнаго тока вращающееся, не вызываетъ никакой особенной разницы. Строго говоря вращающееся поле является даже равнодѣйствующимъ трехъ колеблющихся полей. Такъ какъ это поле не совершенное вращающееся поле, то тамъ, гдѣ приходится говорить о большой точности, даже слѣдуетъ возвращаться къ понятію колеблющагося поля (См. слѣдующую статью).

118. Точный расчетъ электродвижущей силы [1]).

До сихъ поръ мы полагали, что силовой потокъ при своемъ вращеніи имѣетъ синусоидальное распредѣленіе. При этихъ условіяхъ, какъ это и примѣнялось въ послѣднихъ статьяхъ, элсктродвижущая сила равнялась:

$$E = k \cdot \boldsymbol{N} \cdot \sim \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

При чемъ на основаніи указаній стр. 381 и стр. 383

$k = 2{,}12$ при катушечной обмоткѣ;

$k = 1{,}84$ при обмоткѣ винтомъ, при чемъ индуктирующаяся сторона катушки равна $^2/_3$ полюснаго дѣленія;

$k = 2{,}2$ при клѣткообразной обмоткѣ, когда ширина индуктирующейся стороны катушки безконечно мала.

При этомъ мы нашли въ ст. 114, что величина потока равно среднему ариѳметическому изъ величинъ двухъ потоковъ, возникающихъ при наибольшемъ и при нулевомъ значеніяхъ тока въ одной изъ фазъ.

Въ дѣйствительности потокъ измѣняется не по синусоидѣ, и кривая магнитной индукціи, даже если не принимать во вниманіе разсмотрѣнные крайніе моменты времени, въ своей восходящей и нисходящей вѣтви совсѣмъ не симметрична. Такъ какъ обмотку отнюдь нельзя считать гладкой, то и нельзя допустить, что магнитная индукція измѣняется по прямой линіи, какъ это было допущено въ ст. 114. Число каналовъ на индуктирующуюся сторону катушки вовсе уже не такъ велико и на практикѣ иногда бываетъ не болѣе 2-хъ или 3-хъ. Поэтому кривая индукціи вдоль окружности имѣетъ видъ ступенчатый.

Въ виду всего сказаннаго необходимо расчетъ производить съ большой точностью; правда, при этомъ придется отказаться отъ простоты и наглядности, съ которой мы имѣли дѣло при вращающемся полѣ. Кромѣ того, въ дальнѣйшемъ мы ограничимся разсмотрѣніемъ только обыкновенной трехфазной катушечной обмотки.

Разсмотримъ на фиг. 324 фазу, по которой идетъ наибольшій токъ. Въ этотъ моментъ сквозь обмотку проникаетъ наибольшій потокъ, при чемъ этотъ потокъ создается самой этой фазой и двумя другими, по которымъ идетъ токъ вдвое меньшей силы. Если величина этихъ токовъ является синусоидальной функціей времени, то и потокъ, пронизывающій данную

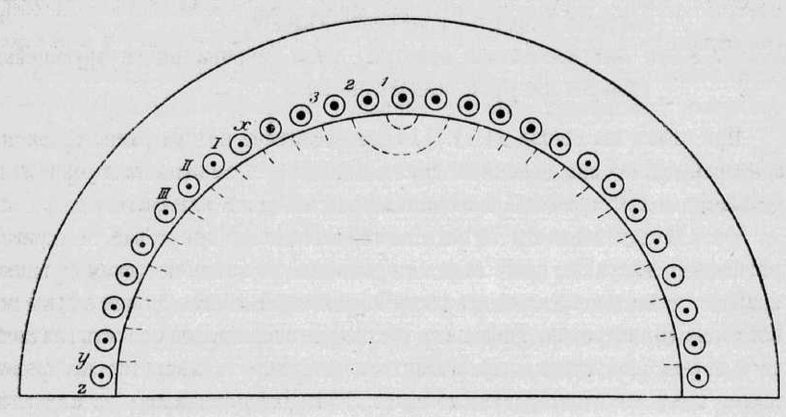
[1]) Ср. Görges ETZ 1897. Ст. 1.

фазу, находится въ синусоидальной зависимости отъ времени, независимо отъ того, какимъ образомъ онъ возникаетъ отъ соединеннаго дѣйствія трехъ фазъ.

Но въ такомъ случаѣ можно примѣнить извѣстную формулу:

$$E_1 = 4{,}44\ \boldsymbol{N}\cdot \sim_1 \cdot \xi \cdot 10^{-8}\,,$$

гдѣ $\boldsymbol{N}$ обозначаетъ наибольшее значеніе потока, который пересѣкаетъ катушку. Въ разсматриваемый моментъ потокъ достигаетъ наибольшаго значенія тамъ, гдѣ токъ въ разсматриваемой фазѣ имѣетъ наибольшіе размѣры. Слѣдуетъ, однако, обратить вниманіе на то, что не всѣ витки нашей фазы пересѣкаетъ одинъ и тотъ же потокъ.



Фиг. 324.

Слѣдовательно, для опредѣленія произведенія $\boldsymbol{N}\cdot\xi$ мы должны потоки отдѣльныхъ зубцовъ помножить на число витковъ разсматриваемой фазы, которые въ данный моментъ находятся въ раіонѣ этихъ потоковъ. Полученные такимъ путемъ «потоко-витки» нужно сложить.

Пусть число каналовъ на индуктирующуюся сторону катушки будетъ a. Допустимъ пока, что въ каждомъ каналѣ находится одинъ витокъ, и что въ каждомъ зубцѣ магнитное сопротивленіе пути силовыхъ линій впередъ и обратно равно единицѣ. При такихъ условіяхъ величина магнитнаго потока, выходящаго изъ зубца, равна величинѣ дѣйствующаго въ данномъ мѣстѣ возбужденія. Пусть наивысшее значеніе тока въ разсматриваемой нами фазѣ равняется 1 амперу; значеніе тока въ другихъ фазахъ въ данный моментъ равно половинѣ ампера.

Тогда изъ фиг. 324 слѣдуетъ:

a) Зубецъ.	Дѣйствующее возбужденіе = потоку въ зубцѣ.	Сопряженные витки.	Потоко-витки.
1	1	1	1
2	3	3	3^2
3	5	5	5^2
.	.	.	.
.	.	.	.
x	a	a	a^2

По дальнѣйшимъ виткамъ проходитъ токъ половинной величины; но потоки уже связаны со всѣми a каналами нашей фазы. Слѣдовательно, мы получаемъ:

b) Зубецъ.	Дѣйствующее возбужденіе = потоку въ зубцѣ.	Сопряженные витки.	Потоко-витки.
I	$a+\frac{1}{2}\cdot 2$	a	$a\,(a+1)$
II	$a+\frac{1}{2}\cdot 4$	a	$a\,(a+2)$
III	$a+\frac{1}{2}\cdot 6$	a	$a\,(a+3)$
.	.	.	.
.	.	.	.
y	$2a-\frac{1}{2}\cdot 2$	a	$a\,(2a-1)$

Число членовъ въ таблицѣ (b) равно $a-1$.

c) Наконецъ, потокъ въ зубцѣ z, соотвѣтствующій возбужденію $2a$, равенъ $2a$, при чемъ онъ связанъ съ a витками нашей фазы, что дастъ еще $2a^2$ потоко-витковъ.

На основаніи теоріи рядовъ получаемъ суммы:

членовъ въ a) . . . . $\dfrac{a^3}{6}+\dfrac{a^2}{2}+\dfrac{a}{3}$

членовъ въ b) . . . . $\dfrac{3}{2}a^3-\dfrac{3}{2}a^2$

Такъ какъ одинаковые потоки возникаютъ и на нижней половинѣ, то полученные въ a) и b) суммы нужно удвоить, полученное же въ c) значеніе войдетъ, какъ оно есть.

Сумма потоко-витковъ будетъ тогда:

$$\frac{2a}{3}(5a^2+1).$$

Въ дѣйствительности дѣло обстоитъ не совсѣмъ такъ. Напримѣръ, потокъ въ зубцѣ z равенъ не $2a$, но произведенію изъ индукціи $\boldsymbol{B}_{max}$ на поверхность зубца. Послѣдняя равна $\frac{\boldsymbol{Q}_l}{3a}$, гдѣ $\boldsymbol{Q}_l$ поверхность полюсовъ и $3a$ — число каналовъ у трехъ фазъ. Слѣдовательно, вычисленную сумму нужно помножить на отношеніе $\frac{\boldsymbol{Q}_l \cdot \boldsymbol{B}_{max}}{3a} : 2a$. Далѣе, потоки пересѣкаютъ въ каждомъ каналѣ не одинъ витокъ, а $\frac{q'}{a}$ витковъ, при чемъ q' — число витковъ на индуктирующуюся сторону катушки. Наконецъ, надлежитъ принять во вниманіе p паръ послѣдовательно соединенныхъ полюсовъ.

Такимъ образомъ мы получимъ:

$$\Sigma \boldsymbol{N} \cdot \xi = \frac{2a}{3}(5a^2+1) \cdot \frac{\boldsymbol{Q}_l \cdot \boldsymbol{B}_{\max}}{3a} \cdot \frac{1}{2a} \cdot \frac{q'}{a} \cdot p.$$

Примемъ:

$$c_0 = \frac{5a^2+1}{9a^2},$$

тогда

$$\Sigma \boldsymbol{N} \cdot \xi = c_0 \cdot p \cdot \boldsymbol{Q}_l \cdot q' \cdot \boldsymbol{B}_{max}$$

При этомъ:

$$\boldsymbol{B}_{max} = \frac{0{,}4\pi \,.\, 2q'}{\boldsymbol{l}_l} \cdot i_{max}.$$

Наши вычисленія относились пока къ нечетному числу каналовъ на индуктирующуюся сторону катушки. Но тотъ же результатъ получается и для четнаго числа каналовъ.

Приведенная таблица дастъ для разныхъ значеній a соотвѣтствующія значенія c_0:

a	c_1
1	0,667
2	0,583
3	0,568
4	0,563
∞	0,555

Электродвижущая сила выразится тогда, согласно уравненію (48) на стр. 319:

$$E_1 = 4{,}44\, c_0 \cdot p \cdot \boldsymbol{Q}_l \cdot q' \cdot \boldsymbol{B}_{max} \cdot \sim_1 \cdot 10^{-8}$$

При гладкой обмоткѣ ($a = \infty$) это выраженіе разнится отъ уравненій (56) на стр. 383 и (69) на стр. 492 съ точностью до 0,2%. Такимъ образомъ представленіе о синусоидальномъ распредѣленіи потока въ пространствѣ мы сможемъ сохранить безъ особой погрѣшности.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ.

---

119. Токъ въ роторѣ, вращающій моментъ и мощность двигателя безъ разсѣянія въ зависимости отъ скольженія.

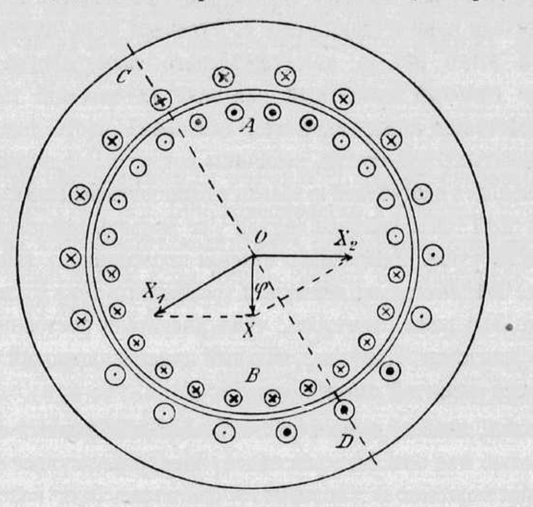
Предположимъ ради упрощенія, что разсѣяніе равно нулю, т. е. что, например, въ частяхъ, замыкающихъ два сосѣдніе зубца статора или ротора, не существуетъ никакого магнитнаго потока. Тогда существуетъ одинъ только силовой потокъ, который проходитъ сквозь желѣзо статора и ротора и воздушный слой. Этотъ силовой потокъ является результатомъ дѣйствія статора и ротора. Далѣе предположимъ, что силовой потокъ N на фиг. 325 у A имѣетъ свою наибольшую положительную величину, а при B—отрицательную. Тогда магнитное поле при A создаетъ середину сѣвернаго полюса, а при B—середину южнаго полюса. Слѣдовательно, силовыя линіи этого поля направляются сверху внизъ, и мы проводимъ, поэтому, векторъ равнодѣйствующаго возбужденія OX вертикально сверху внизъ.

Если поле вращается по часовой стрѣлкѣ, то въ роторѣ индуктируется токъ, который при A и B будетъ наибольшимъ. Согласно правилу Фарадея, мы увидимъ тогда при A передній, а при B задній конецъ стрѣлокъ

направленія тока. Каждая фаза ротора въ данномъ примѣрѣ умѣщается въ 4 каналахъ. Слѣдовательно, въ каналахъ при A и B мы очерчиваемъ остріе и перья стрѣлки особенно жирно. Въ сосѣднихъ фазахъ токъ въ два раза слабѣе, что мы и обозначаемъ посредствомъ болѣе слабо очерченныхъ соотвѣтствующихъ частей стрѣлокъ.

Векторъ возбужденія, создаваемаго роторомъ, OX_2 идетъ тогда слѣва направо, такъ какъ онъ долженъ имѣть то же направленіе, что силовыя линіи, порождаемыя однимъ только роторомъ.

Для того, чтобы возникало равнодѣйствующее возбужденіе X, необходимо, чтобы возбужденіе статора по величинѣ и фазѣ равнялось OX_1.



Фиг. 325.

Максимумъ тока въ статорѣ будетъ, слѣдовательно, при C и D, и при C мы должны поставить перья стрѣлки, а при D—остріе. Каждая фаза статора въ данномъ случаѣ умѣщается въ трехъ каналахъ. Мы вычерчиваемъ въ фазѣ при C и D стрѣлку тока наиболѣе жирно, а у сосѣднихъ фазъ вдвое слабѣе.

Фиг. 325 указываетъ намъ:

1. что первичный и вторичный токи, подобно тому, какъ у трансформаторовъ, имѣютъ почти противоположное другъ другу направленіе, по крайней мѣрѣ вдоль большой части боковой поверхности,
2. что индуктируемый токъ въ роторѣ наиболѣе силенъ тамъ, гдѣ наиболѣе сильно пересѣкающее роторъ равнодѣйствующее поле;
3. что векторъ тока въ роторѣ перпендикуляренъ къ вектору поля, пересѣкающаго роторъ.

Примемъ во вниманіе еще то, что поле пересѣкаетъ не только роторъ, но и статоръ; тогда получаемъ, что наибольшая электродвижущая сила въ изображенный моментъ индуктируется у A и B, въ то время, какъ токъ въ статорѣ наибольшимъ будетъ при C и D. Если пренебречь омическимъ сопротивленіемъ, то окажется, что противоэлектродвижущая сила имѣетъ фазу, прямо противоположную фазѣ напряженія у зажимовъ. Слѣдовательно, имѣемъ:

4. что токъ въ статорѣ отстаетъ отъ напряженія въ статорѣ на изображенный на фигурѣ уголъ φ.

Такой сравнительно большой сдвигъ фазъ вызывается тѣмъ, что трехфазные двигатели сами создаютъ свое собственное поле (индукціонные двигатели), для этого изъ-за междужелѣзнаго пространства необходимъ сравнительно сильный безваттный или намагничивающій токъ. Несмотря на то, что разстояніе между якоремъ и статоромъ часто доводятъ до нѣсколькихъ десятыхъ милиметра, величины $\cos\varphi = 0{,}9$ достигаютъ все же только у большихъ двигателей и только у слишкомъ большихъ ее превосходятъ. Безваттный токъ, какъ мы видѣли уже раньше, представляетъ собою безполезную нагрузку поперечнаго сѣченія проводниковъ генератора, сѣти и двигателя. Слѣдовательно, двигатели трехфазнаго тока должны строиться сравнительно большихъ размѣровъ, чѣмъ двигатели постояннаго тока или синхронные двигатели. Наконецъ, сильный намагничивающій токъ особенно непріятенъ при холостой работѣ.

Опредѣлимъ, теперь, путемъ разсчета наиболѣе важныя величины двигателя, полагая, что онъ безъ разсѣянія. Электродвижущая сила зависитъ отъ магнитнаго потока $\boldsymbol{N}$, который у двигателя безъ разсѣянія будетъ общимъ для ротора и статора. Слѣдовательно, индуктируемая электродвижущая сила E_1 въ статорѣ будетъ:

$$E_1 = k \cdot \boldsymbol{N} \cdot \sim_1 \cdot z_1' \cdot 10^{-8}.$$

Пренебрегаемъ, теперь, омической потерей въ статорѣ. Тогда E_1 равновелико e_1, стало быть постоянно. Согласно предыдущему уравненію, равнодѣйствующій потокъ $\boldsymbol{N}$ будетъ также постояннымъ.

Когда же это общее поле пересѣкаетъ проволоки ротора при числѣ періодовъ $\sim$, соотвѣтствующемъ скольженію, то въ этихъ послѣднихъ индуктируется электродвижущая сила

$$E_2 = k \cdot \boldsymbol{N} \cdot \sim \cdot z_2' \cdot 10^{-8}.$$

Ради упрощенія предположимъ, что у статора и ротора обмотка одного и того же типа, такъ что коэффиціентъ k для статора и ротора будетъ одинаковъ.

Токъ въ роторѣ тогда будетъ $i_2 = E_2/w_2$, слѣдовательно, онъ пропорціоналенъ числу періодовъ скольженія. Поэтому, если черезъ c_1 обозначимъ постоянный коэффиціентъ, то получимъ:

$$i_2 = c_1 \cdot \sim.$$

Вращающій моментъ опредѣляется, согласно уравненію (70), стр. 500 произведеніемъ силы тока въ роторѣ i_2 на магнитный потокъ $\boldsymbol{N}$. Послѣдній въ данномъ случаѣ представляетъ величину постоянную, въ то время какъ токъ въ якорѣ пропорціоналенъ скольженію. Поэтому, если черезъ c_2 обозначимъ постоянный коэффиціентъ, то получаемъ:

$$M_d = c_2 \cdot \sim.$$

Мощность, передаваемая ротору P_2, также пропорціональна, согласно уравненію (71), стр. 500, произведенію магнитнаго потока на токъ въ роторѣ. При постоянномъ магнитномъ потокѣ она, слѣдовательно, пропорціональна скольженію. Если, теперь, черезъ c_3 обозначимъ постоянный коэффиціентъ, то имѣемъ:

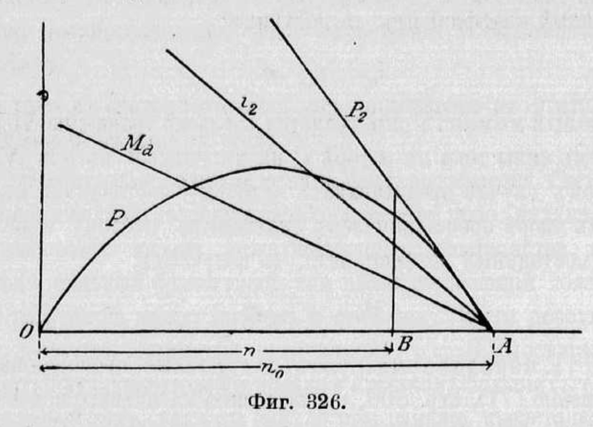
$$P_2 = c_3 \cdot \sim.$$

Наконецъ, механическая мощность P получается посредствомъ вычитанія изъ всей мощности, сообщаемой ротору, мощности, затрачиваемой въ роторѣ на тепло Джоуля. Потери же на тепло Джоуля пропорціональны квадрату силы тока, слѣдовательно, квадрату скольженія. Поэтому, если обозначимъ черезъ c_4 постоянный коэффиціентъ пропорціональности и черезъ w_2 сопротивленіе ротора на фазу, то получаемъ:

$$P = P_2 - 3 \cdot i_2^2 \cdot w_2 = c_3 \cdot \sim - c_4 \cdot \sim^2.$$

Отложимъ, теперь, на фиг. 326 число оборотовъ по оси абсциссъ, а токъ въ роторѣ, вращающій моментъ, передаваемую мощность и механическую мощность нанесемъ въ видѣ ординатъ. Если OA будетъ число оборотовъ n_0 при абсолютно холостомъ ходѣ OB и число оборотовъ n при нѣкоторомъ опредѣленномъ состояніи работы, то $OA - OB = BA$ будетъ потеря числа оборотовъ вслѣдствіе скольженія. Токъ въ роторѣ i_2, вращающій моментъ M_d и мощность, передаваемая ротору, P_2 будутъ пропорціональны этой потерѣ въ числѣ оборотовъ и представятся, поэтому, ординатами прямыхъ на фиг. 326. Наоборотъ, механическая мощность изобра-

зится ординатою параболы. Она въ точкѣ O равна нулю, гдѣ число оборотовъ равно нулю, гдѣ, слѣдовательно, двигатель будетъ заторможенъ. Но она равна также нулю и въ точкѣ A, т. е. при абсолютно холостомъ ходѣ. При скольженіи въ 50%, т. е. при числѣ оборотовъ n, равномъ $n_0/2$, механическая мощность достигаетъ своей наибольшей величины. Нормальная



Фиг. 326.

работа находится, понятно, значительно дальше вправо, такъ какъ тогда скольженіе и потери въ роторѣ сравнительно малы, слѣдовательно, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія сравнительно высокъ.

Практически выполненный двигатель отличается отъ только что разсмотрѣннаго идеальнаго, главнымъ образомъ, только вращающимъ моментомъ при пускѣ въ ходъ и способностью къ перегрузкѣ.

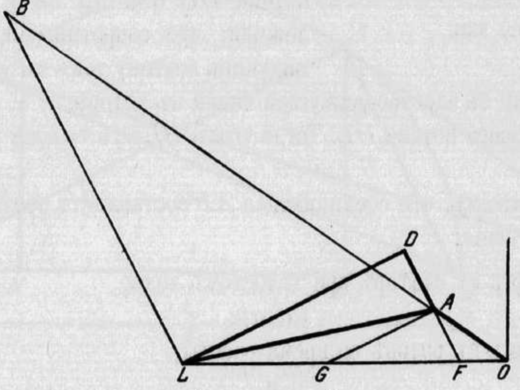
При пускѣ въ ходъ число оборотовъ равно нулю, и наша діаграмма даетъ для даннаго момента особенно большой вращающій моментъ. У практически выполненнаго двигателя, наоборотъ, вращающій моментъ при пускѣ въ ходъ, вслѣдствіе разсѣянія, особенно малъ. Поэтому пуска въ ходъ при нагрузкѣ достигаютъ только тѣмъ, что включаютъ въ цѣпь ротора сопротивленіе.

120. Круговая діаграмма трехфазнаго двигателя.

Затормозимъ двигатель, включимъ въ цѣпь ротора безъиндукціонное сопротивленіе и произведемъ изслѣдованіе двигателя, разсматривая его, какъ трансформаторъ. При этомъ, въ данномъ случаѣ появятся токи и силовые потоки, которые по величинѣ и фазѣ не отличаются отъ послѣднихъ, возникающихъ въ двигателѣ съ такой же первичной силой тока и работающемъ, какъ трехфазный двигатель. Число витковъ на роторѣ и статорѣ пусть пока будетъ одинаковымъ.

Если пренебречь первичными потерями, то вслѣдствіе постояннаго напряженія у зажимовъ въ статорѣ будетъ постоянная противоэлектродвижущая сила. Поэтому, полный силовой потокъ въ статорѣ остается одинаковымъ какъ при всѣхъ рабочихъ состояніяхъ, такъ и при холостомъ ходѣ. Этотъ потокъ отстаетъ на 90° отъ напряженія у зажимовъ, векторъ котораго совпадаетъ съ осью ординатъ; векторъ же потока на фиг. 327 изображенъ отрѣзкомъ OL.

Этотъ силовой потокъ въ статорѣ при холостомъ ходѣ разлагается на потокъ разсѣянія статора OF и на силовой потокъ воздушнаго слоя, который при холостомъ ходѣ проникаетъ въ роторъ при полной своей силѣ. Во время работы полный силовой потокъ статора также представляетъ

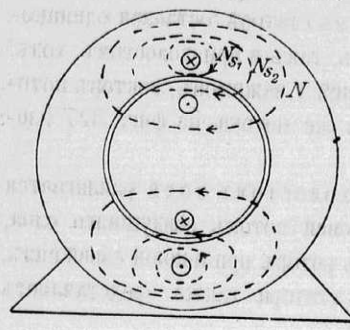


Фиг. 327. OL потокъ въ статорѣ при работѣ и холостомъ ходѣ; OF потокъ разсѣянія статора при холостомъ ходѣ; FL потокъ въ воздушномъ слоѣ при холостомъ ходѣ; OA потокъ разсѣянія статора при работѣ; AL потокъ въ воздушномъ слоѣ при работѣ; AD потокъ разсѣянія ротора при работѣ; DL потокъ въ роторѣ при работѣ.

собой сумму потока разсѣянія статора и силового потока воздушнаго слоя. Если векторъ первичнаго тока при извѣстномъ рабочемъ состояніи совпадаетъ съ направленіемъ OB, то OA изображаетъ первичный потокъ разсѣянія N_{s_1}, а геометрическая разность AL—силовой потокъ воздушнаго слоя при рабочемъ ходѣ.

Послѣдній, однако, при рабочемъ ходѣ проникаетъ въ роторъ не при полной своей силѣ. Какъ и въ трансформаторѣ, здѣсь возникаетъ токъ въ роторѣ, по направленію почти прямо противоположный току въ статорѣ. Положимъ, векторъ этого тока на фиг. 327, идетъ по направленію BL, т. е. составляющая тока въ статорѣ, уравновѣшивающая токъ въ роторѣ, пойдетъ по направленію LB. Намагничивающая сила этой составляющей

направляетъ потокъ разсѣянія ротора N_{s_2}, какъ показываетъ фиг. 328, въ сторону по пути разсѣянія ротора. Поэтому векторъ потока утечки, создаваемаго токомъ статора, параллеленъ LB. На фиг. 327 онъ изображенъ отрѣзкомъ AD. Тогда геометрическая разность DL представляетъ собой силовой потокъ ротора во время работы.

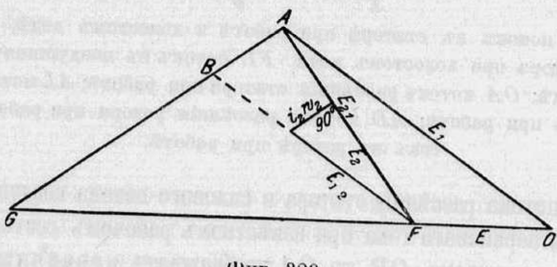


Фиг. 328.

Этотъ силовой потокъ ротора DL индуктируетъ въ роторѣ электродвижущую силу, которая отстаетъ на 90° отъ потока DL (см. стр. 322). Мы предположили, что сопротивленіе ротора безъ индукціи, поэтому токъ въ роторѣ имѣетъ одинаковую фазу съ электродвижущей силой въ роторѣ, т. е. онъ отстаетъ на 90° отъ силового потока DL. Тогда уголъ BLD, а также уголъ LDA прямые.

Теперь докажемъ, что соединяющая AF составляетъ продолженіе DA. Введемъ обозначенія:

i_0 токъ въ статорѣ при холостомъ ходѣ;
i_1 » » » » работѣ,
i_2 токъ въ роторѣ во время работы,



Фиг. 329.

c_1 силовой потокъ воздушнаго слоя при разомкнутомъ роторѣ и при силѣ тока въ статорѣ въ 1 амперъ,
τ_1 и τ_2 отношенія магнитнаго сопротивленія воздушнаго слоя къ сопротивленію пути разсѣянія въ статорѣ и роторѣ.

При холостомъ ходѣ параллельно включенные силовые потоки въ междужелѣзномъ пространствѣ и по пути утечки въ статорѣ обратно пропорціональны магнитнымъ сопротивленіямъ. Поэтому:

$FL = c_1 \cdot i_0$ силовой потокъ воздушнаго слоя при холостомъ ходѣ,
$OF = c_1 \cdot \tau_1 \cdot i_0$ потокъ разсѣянія статора при холостомъ ходѣ,
$OA = c_1 \cdot \tau_1 \cdot i_1$ » » » во время работы,
$AD = c_1 \cdot \tau_2 \cdot i_2$ » » ротора во время работы.

Вмѣстѣ съ тѣмъ силовой потокъ воздушнаго слоя, возникающій благодаря совмѣстному дѣйствію токовъ въ статорѣ и роторѣ, является равнодѣйствующей изъ AB (въ фазѣ съ i_1 токомъ въ статорѣ) и BL (въ фазѣ съ i_2 токомъ въ роторѣ). При этомъ:

$$AB = c_1 \cdot i_1, \qquad BL = c_1 \cdot i_2.$$

Фиг. 330.

Изъ предыдущихъ равенствъ слѣдуетъ:

$$OA : AB = OF : FL = \tau_1.$$

Поэтому, соединяющая линія AF параллельна BL, т. е. она составляетъ продолженіе DA. Такимъ образомъ, если, теперь, проведемъ AG параллельно DL, то уголъ FAG будетъ тоже прямымъ.

Одновременно полагая:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 \quad \text{(a)}$$

получимъ, на основаніи предыдущихъ равенствъ:

$$AF = BL \cdot \frac{OA}{OA + AB} = \frac{\tau_1}{1 + \tau_1} \cdot c_1 \cdot i_2$$

$$FG = FL \cdot \frac{AF}{AF + DA} = \frac{\tau_1}{\tau} \cdot c_1 \cdot i_0 .$$

Раздѣливъ всѣ векторы на $\tau_1 \cdot c_1$, получимъ новую діаграмму, изображенную на фиг. 330, которая напоминаетъ діаграмму OAG на фиг. 327. Если затѣмъ вслѣдствіе различнаго числа витковъ замѣнимъ силу тока i_2 значеніемъ $i_2 \cdot \frac{z_2}{z_1}$, то на діаграммѣ фиг. 330 будетъ:

$$OF = i_0, \qquad FG = \frac{i_0}{\tau},$$

$$OA = i_1, \qquad AF = \frac{1}{1+\tau_1} \cdot \frac{i_2 \cdot z_2}{z_1} \quad . \; . \; . \; . \; (b)$$

Такъ какъ и на фиг. 330 уголъ FAG прямой, то конечная точка вектора первичнаго тока лежитъ на полуокружности діаметра $FG = \frac{i_0}{\tau}$ (Діаграмма Heyland'а). Векторъ напряженія у зажимовъ e_1 при этомъ опережаетъ на 90° полный силовой потокъ въ статорѣ.

Болѣе скоро, но не такъ наглядно можно придти къ круговой діаграммѣ слѣдующимъ путемъ, при чемъ допускаемъ, какъ и раньше, что число витковъ на статорѣ и роторѣ одинаково; при этомъ можно разсматривать сразу вращающійся роторъ. Токамъ въ статорѣ и роторѣ, каждому въ отдѣльности, приписывается особый силовой потокъ, который протекаетъ по пути разсѣянія и по общему полезному пути силовыхъ линій.

Независимо отъ тока въ роторѣ статоръ индуктируетъ въ самомъ себѣ электродвижущую силу:

$$E_1 = k \cdot c_1 \cdot i_1 (1+\tau_1) \cdot \backsim_1,$$

гдѣ k постоянный коэффиціентъ.

Далѣе, независимо отъ тока въ статорѣ, создаваемое роторомъ поле, которое (см. стр. 512) пересѣкаетъ статоръ съ первичнымъ числомъ періодовъ, индуктируетъ въ этомъ послѣднемъ электродвижущую силу:

$$E_{21} = k \cdot c_1 \cdot i_2 \cdot \backsim_1.$$

Обѣ электродвижущія силы, будучи геометрически сложены на фиг. 329, даютъ электродвижущую силу при холостомъ ходѣ:

$$E = k \cdot c_1 \cdot i_0 \, (1+\tau_1) \cdot \backsim_1.$$

Во вращающейся фазѣ ротора нужно вмѣсто числа періодовъ у индуктируемой статоромъ электродвижущей силы и тока въ роторѣ подставить скольженіе $\backsim$. Слѣдовательно, роторъ индуктируетъ въ самомъ себѣ электродвижущую силу:

$$E_2 = k \cdot c_1 \cdot i_2 (1+\tau_2) \cdot \backsim,$$

а статоръ индуктируетъ въ роторѣ электродвижущую силу:

$$E_{12} = k \cdot c_1 \cdot i_1 \cdot \backsim.$$

Обѣ электродвижущія силы E_2 и E_{12} даютъ равнодѣйствующую, равную омической потерѣ напряженія $i_2 \cdot w_2$ въ фазѣ ротора. Она опережаетъ на 90° электродвижущую силу E_2 (см. стр. 321). Число періодовъ на діаграммахъ для статора и ротора, конечно, не одинаково. Но сдвигъ фазъ между E_1 и E_{21} такой же, какъ и сдвигъ между E_{12} и E_2.

Такимъ образомъ, мы получаемъ діаграмму, изображенную на фиг. 329, на который векторъ E_2 имѣетъ то же направленіе, что и E_{21}, и векторъ E_{12} имѣетъ то же направленіе, что и E_1. Если мы, теперь, проведемъ AG параллельно $i_2 \cdot w_2$, то получимъ:

$$\frac{FG}{OG} = \frac{FB}{OA} = \frac{E_{12} \cdot E_{21}/E_2}{E_1}.$$

На основаніи формулъ для электродвижущихъ силъ имѣемъ:

$$\frac{FG}{OG} = \frac{1}{(1+\tau_1) \cdot (1+\tau_2)} = \frac{1}{1+\tau}, \qquad \frac{FG}{OF} = \frac{1}{\tau}.$$

Раздѣлимъ, теперь, всѣ векторы на $k \cdot c_1 \cdot (1+\tau_1) \cdot \backsim_1$ и, принимая во вниманіе въ то же время вторичное число витковъ, получимъ:

$$OF = i_0, \qquad FG = \frac{i_0}{\tau},$$

$$OA = i_1, \qquad AF = \frac{i_2 \cdot z_2 / z_1}{1+\tau_1}.$$

121. Мощность, передаваемая ротору, вращающій моментъ и скольженіе согласно круговой діаграммѣ.

Мы можемъ теперь посмотрѣть, выполняется ли на нашей діаграммѣ законъ сохраненія энергіи.

Согласно уравненію (71), на стр. 500, передаваемая ротору мощность для всѣхъ трехъ фазъ вмѣстѣ будетъ:

$$P_2 = 3k \cdot N \cdot \backsim_1 \cdot z_2{}' \cdot 10^{-8} \cdot i_2.$$

Съ другой стороны передаваемая статору мощность будетъ:

$$P_1 = 3e_1 \cdot i_1 \cdot cos\,\varphi = 3e_1 \cdot AH.$$

Такъ какъ $FL \cdot (1+\tau_1)$ на фиг. 327 представляетъ полный силовой потокъ въ роторѣ, то мы получаемъ:

$$e_1 = k \cdot FL \cdot (1+\tau_1) \cdot \sim_1 \cdot z_1' \cdot 10^{-8}.$$

Вводимъ, далѣе, на основаніи фиг. 327, соотношенія:

$$FL = DL \cdot \frac{FG}{AG} = N \cdot \frac{FG}{AG}.$$

Наконецъ, на основаніи фиг. 330:

$$\frac{FG}{AG} = \frac{FA}{AH}.$$

Принимая во вниманіе, что $FA = \frac{i_2 \cdot z_2'}{(1+\tau_1) \cdot z_1'}$ получаемъ, что $P_1 = P_2$, т. е.

$$P_2 = 3e_1 \cdot i_1 \cdot \cos\varphi = 3e_1 \cdot AH.$$

Мощность P_2 передается ротору посредствомъ поля, вращающагося съ числомъ оборотовъ $\omega = 2\pi \cdot \sim_1/p$, при чемъ безразлично, вращается ли роторъ или заторможенъ на мѣстѣ путемъ включенія въ цѣпь ротора сопротивленія. Слѣдовательно, вращающій моментъ, если мощность $3e_1 \cdot AH$ раздѣлить на $\omega \cdot 9{,}81$, будетъ:

$$M_d = \frac{3e_1 \cdot AH}{\omega \cdot 9{,}81} = \frac{e_1 \cdot p}{20{,}5 \cdot \sim_1} \cdot AH.$$

Скольженіе, на основаніи стр. 502, равно:

$$\frac{\sim}{\sim_1} = \frac{3 \cdot i_2^2 \cdot w_2}{P_2}.$$

На основаніи извѣстной теоремы изъ планиметріи,

$$AF^2 = \frac{i_2^2 \cdot z_2^2}{(1+\tau_1)^2 \cdot z_1^2} = \frac{i_0}{\tau} \cdot FH.$$

Подставимъ, теперь, получающееся отсюда выраженіе для i_2^2, а также выраженіе $P_2 = 3 \cdot e_1 \cdot AH$, въ вышеприведенную формулу для $\frac{\sim}{\sim_1}$. Затѣмъ, вмѣсто выраженія $\frac{FH}{AH}$, подставимъ равное ему, согласно фиг. 330, величину $tg\beta$ и положимъ:

$$w'' = \frac{(1+\tau_1)^2 z_1^2 \cdot w_2}{z_2^2}$$

Тогда получаемъ:

$$\frac{\sim}{\sim_1} = \frac{i_0 \cdot w''}{\tau \cdot e} \cdot tg\beta \quad \ldots\ldots\ldots \quad (a)$$

Слѣдовательно, относительное скольженіе пропорціонально тангенсу угла β.

Чтобы опредѣлить токъ OJ при пускѣ въ ходъ, замѣтимъ, что скольженіе при пускѣ въ ходъ равно 100%, т. е., что $\frac{\sim}{\sim_1}$ равно 1. Слѣдовательно, изъ фиг. 330, на основаніи равенства (a), получимъ:

$$tg\,\beta_0 = \frac{\tau \cdot e}{i_0 \cdot w''} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (b)$$

Этимъ отношеніемъ опредѣляется токъ при короткомъ замыканіи OJ.

Опустимъ, теперь, изъ точки K вектора GJ перпендикуляръ KN на діаметръ окружности, при чемъ KN пусть будетъ равнымъ 100 мм. Этотъ перпендикуляръ пересѣкаетъ линію GA въ точкѣ M. Тогда при токѣ въ статорѣ OA, на основаніи равенствъ (a) и (b), получаемъ:

$$\frac{\sim}{\sim_1} = \frac{tg\beta}{tg\beta_0} = \frac{MN}{KN}.$$

Такъ какъ KN было отложено равнымъ 100 мм., то длина MN въ мм. дастъ процентъ скольженія.

Для полученія механической мощности двигателя, мы проведемъ прямую FJ, которая пересѣчетъ ординату HA въ точкѣ P. Тогда уголъ FPH равенъ β_0 и мы получаемъ:

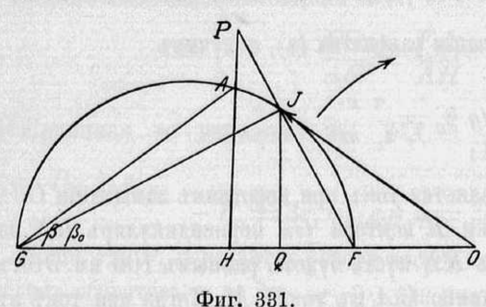
$$\frac{\sim}{\sim_1} = \frac{tg\beta}{tg\beta_0} = \frac{HF}{AH} : \frac{HF}{PH} = \frac{PH}{AH}.$$

Такъ какъ относительное скольженіе равнялось относительной потерѣ въ роторѣ и AH является мѣрою мощности P_2, сообщаемой ротору, то PH, выраженное въ томъ же самомъ масштабѣ, представляетъ собою потерю въ роторѣ, а разность AP—механическую мощность P. Слѣдовательно,

$$P = 3 \cdot e_1 \cdot AP \text{ ваттъ.}$$

Эта механическая мощность состоитъ изъ энергіи, теряемой на треніе, и полезной мощности.

Особый интересъ представляетъ рабочее состояніе, при которомъ скольженіе превышаетъ 100°/o. Это будетъ имѣть мѣсто тогда, когда въ цѣпь ротора двигателя, который долженъ поднять вверхъ опредѣленный грузъ, мы, не измѣняя соединенія статора, введемъ такое большое сопротивленіе, что вращающій моментъ не въ состояніи будетъ преодолѣть нагрузку. Тогда грузъ погонитъ двигатель въ обратномъ направленіи, въ то время, какъ вращающееся поле его будетъ продолжать перемѣщаться въ прежнемъ направленіи. Доставляемая такимъ способомъ механическая работа, вмѣстѣ съ сообщаемой статору электрической работой, превратится, благодаря сопротивленію ротора, въ тепло Джоуля, и двигатель вслѣдствіе этого станетъ затормаживаться. При такомъ состояніи работы конечная точка вектора первичнаго тока A будетъ находиться, считая отъ точки F, за точкой J короткаго замыканія, при чемъ послѣдняя, вслѣдствіе большого сопротивленія въ роторѣ, значительно перемѣстится вправо (фиг. 331). Точка P пересѣченія вектора FJ съ AH расположится теперь на продолженіи AH. Какъ и раньше, пусть представляютъ:



Фиг. 331.

AH доставляемую электрическую мощность,

AP механическую мощность, доставляемую теперь грузомъ,

PH мощность, превращенную въ роторѣ въ тепло Джоуля.

Будемъ, теперь, уменьшать сопротивленіе въ роторѣ. Тогда уголъ β_0 будетъ увеличиваться, и точка J наконецъ совпадетъ съ точкой A. Такимъ образомъ, вращающій моментъ при короткомъ замыканіи сдѣлается равнымъ моменту нагрузки, и двигатель остановится. Уменьшеніе сопротивленія въ роторѣ вызываетъ, слѣдовательно, въ данномъ случаѣ уменьшеніе числа оборотовъ.

Практическій интересъ представляетъ еще тотъ случай, когда точка A будетъ перемѣщаться по окружности вправо до тѣхъ поръ, пока не очутится ниже оси абсциссъ. Этотъ случай имѣетъ мѣсто тогда, когда двигатель безъ измѣненія соединенія будетъ приводится во вращеніе механическимъ путемъ въ прежнемъ направленіи со скоростью, превышающей синхронизмъ [1]). Электрическая мощность при этомъ становится отрицательной,

[1]) При перемѣнѣ направленія вращенія нужно измѣнить соединеніе.

т. е. двигатель не получаетъ уже больше электрической мощности, а отдаетъ ее самъ, поглащая при этомъ механическую мощность. Двигатель становится тогда асинхроннымъ генераторомъ. Этимъ способомъ легко достигается электрическое торможеніе при трехфазномъ токѣ. Асинхронные генераторы вслѣдствіе простоты конструкции находятъ себѣ примѣненіе также на центральныхъ станціяхъ. Намагничивающій токъ, какъ и раньше, они заимствуютъ, конечно, изъ сѣти, которую долженъ въ это время питать хотя бы синхронный генераторъ. Асинхронный же генераторъ можетъ вырабатывать необходимый для своего возбужденія безваттный токъ тѣмъ, что будетъ работать на перевозбужденный синхронный двигатель, или на перевозбужденный вращающійся преобразователь.

122. Коэффиціентъ мощности, нормальная нагрузка, вращающій моментъ при пускѣ въ ходъ и наибольшій вращающій моментъ.

Сдвигъ фазъ между напряженіемъ и силою тока будетъ наименьшимъ, когда векторъ первичнаго тока будетъ касательной къ полуокружности. Слѣдовательно, для этого состоянія работы и нужно строить двигатель. Максимальный коэффиціентъ мощности получается тогда на основаніи фиг. 330.

$$(\cos\varphi)_{max} = \frac{i_0/2\tau}{i_0 + i_0/2\tau} = \frac{1}{1+2\tau} \quad \ldots\ldots \quad (73)$$

Такимъ образомъ, наибольшій коэффиціентъ мощности при пренебреженіи первичными потерями зависитъ исключительно отъ коэффиціента разсѣянія τ. Нижеприведенная таблица даетъ наибольшій коэффиціентъ мощности для различныхъ значеній коэффиціента разсѣянія въ предположеніи, что $\tau_1 = \tau_2$. Мы видимъ изъ таблицы, что значеніе $\cos\varphi = 0{,}9$ трудно достигается и рѣдко можетъ быть превзойдено, такъ какъ при этомъ необходимо, чтобы $\tau_1 = \tau_2$ равнялось 0,03 [1]). Далѣе слѣдуетъ изъ

[1]) Heyland достигаетъ величины $\cos\varphi = 1$ тѣмъ, что пускаетъ намагничивающій токъ не въ статоръ, а въ роторъ—при помощи коллектора съ большимъ числомъ пластинъ. Такъ какъ индуктируемая въ роторѣ электродвижущая сила соотвѣтствуетъ только незначительному числу періодовъ скольженія, то для того, чтобы намагничивающій токъ прогнать черезъ обмотку ротора, оказывается достаточнымъ очень небольшое напряженіе. Обыкновенно это напряженіе заимствуется, отъ нѣсколькихъ катушекъ статора. Вслѣдствіе этого расходъ безваттнаго тока почти не оказываетъ никакаго вліянія на полный токъ, притекающій къ статору, и сдвигъ фазъ между первичнымъ напряженіемъ и первичнымъ токомъ равенъ нулю (ср. ETZ. 1901, стр. 633; 1902, стр. 28 и 533; 1903, стр. 51, 72, 95 и 213).

фиг. 330, что наиболѣе выгодный рабочій токъ i_1, векторъ котораго является касательной, находится въ извѣстномъ соотношеніи съ величиною i_0. Это соотношеніе выражается уравненіемъ:

$$i_1{}^2 = \left(\frac{i_0}{2\tau} + i_0\right)^2 - \left(\frac{i_0}{2\tau}\right)^2.$$

Отсюда слѣдуетъ:

$$\frac{i_0}{i_1} = \sqrt{\frac{\tau}{1+\tau}}.$$

Сооотвѣтствующія величины этого отношенія i_1/i_0 указаны въ таблицѣ для различныхъ значеній коэффиціента разсѣянія. Отсюда мы видимъ, что для полученія наиболѣе выгоднаго нормальнаго состоянія работы токъ при холостомъ ходѣ составляетъ отъ $^1/_5$ до $^1/_3$ рабочаго тока. Этотъ сравнительно сильный токъ при холостомъ ходѣ обусловливается воздушнымъ слоемъ между статоромъ и роторомъ и хотя является токомъ безваттнымъ, но служитъ однимъ изъ самыхъ большихъ недостатковъ двигателя трехфазнаго тока. При утечкѣ всего въ 2% въ статорѣ и роторѣ, токъ при холостомъ ходѣ составляетъ все же 0,197 нормальнаго рабочаго тока.

Для опредѣленія **способности двигателя перегружаться** предположимъ снова, что двигатель при нормальной нагрузкѣ работаетъ съ наименьшимъ сдвигомъ фазъ, такъ что векторъ первичнаго тока является касательной къ полуокружности. Если опять i_1 будетъ **нормальнымъ токомъ**, т. е. касательной, то $i_1 \cdot (\cos\varphi)_{max}$, согласно уравненія для M_d на стр. 520, явится мѣрою для нормальнаго вращающаго момента, въ то время, какъ радіусъ полуокружности $\frac{i_0}{2\tau}$ — мѣрою наибольшаго вращающаго момента. Слѣдовательно, способность перегружаться мы получимъ согласно уравненію (73):

$$\frac{\text{Наибольшій вращающій моментъ}}{\text{Нормальный вращающій моментъ}} = \frac{i_0/2\tau}{i_1 \cdot (\cos\varphi)_{max}} = \frac{i_0}{i_1} \cdot \frac{1+2\tau}{2\tau}.$$

На основаніи этого уравненія опредѣлены величины послѣдняго ряда нижеприведенной таблицы.

$\tau_1 = \tau_2$	$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2$	$\cos\varphi_{max} = \frac{1}{1+2\tau}$	$\frac{i_0}{i_1} = \sqrt{\frac{\tau}{1+\tau}}$	Способность перегружаться. $= \frac{i_0}{i_1} \cdot \frac{1+2\tau}{2\tau}$
0,07	0,145	0,776	0,355	1,58
0,06	0,124	0,802	0,33	1,65
0,05	0,103	0,83	0,305	1,78
0,04	0,082	0,86	0,275	1,95
0,03	0,061	0,892	0,24	2,2
0,02	0,040	0,925	0,197	2,63

Изъ этой таблицы мы видимъ, что перегрузка до 2,6-кратнаго вращающаго момента, развиваемаго при наименьшемъ сдвигѣ фазъ, достигается съ трудомъ. Само собою понятно, что можно построить двигатель такимъ образомъ, чтобы векторъ его нормальнаго первичнаго тока былъ меньше касательной. Это увеличитъ только несущественно уголъ φ въ то время, какъ способность перегружаться, отнесенная къ болѣе слабой нагрузкѣ, понятно, значительно увеличится.

Особенный интересъ представляетъ также **вращающій моментъ при пускѣ въ ходъ**. Если сопротивленіе ротора равно нулю, то, согласно уравненіямъ (b), на стр. 521, имѣемъ:

$$tg\,\beta_0 = \frac{\tau \cdot e}{i_0 \cdot w''} = \infty.$$

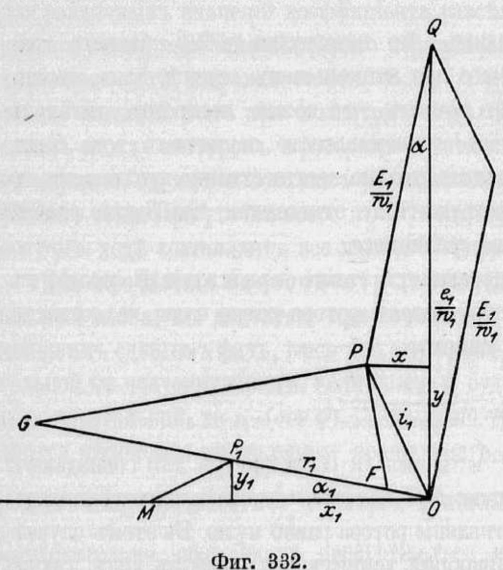
Уголъ β_0 равенъ тогда 90° и точки J и G на фигурѣ 330 совпадаютъ другъ съ другомъ. Слѣдовательно, OG является токомъ при пускѣ въ ходъ въ статорѣ тогда, когда сопротивленіе ротора равно нулю. Въ этомъ случаѣ ордината круга, а потому и вращающій моментъ при пускѣ въ ходъ, также равны нулю. Это объясняется тѣмъ, что при короткомъ замыканіи всѣ силовыя линіи изъ ротора вытѣсняются на путь разсѣянія ротора, такимъ образомъ витки ротора вообще остаются внѣ раіона дѣйствующаго поля.

Если даже ввести въ уравненіе для β_0 сопротивленіе ротора, имѣющееся у него въ дѣйствительности, то векторъ OJ все же направится круто вверхъ. Но точка J, соотвѣтствующая моменту пуска въ ходъ, будетъ находиться еще очень низко, и вращающій моментъ при пускѣ въ ходъ будетъ очень незначителенъ. Ясно, что включеніемъ пускового реостата въ цѣпь ротора сопротивленіе w'' можетъ быть произвольно повышено. Поэтому, согласно вышеуказанному уравненію, уголъ β_0 будетъ меньше, такимъ образомъ ордината круга и вращающій моментъ при пускѣ въ ходъ увеличатся.

123. Круговая діаграмма при потеряхъ въ мѣди первичной цѣпи.

Въ ст. 120 мы полагали, что омическое сопротивленіе въ статорѣ равно нулю. Въ этомъ случаѣ напряженіе у зажимовъ e_1 равно и по направленію противоположно противоэлектродвижущей силѣ E_1.

Если мы примемъ, теперь, во вниманіе сопротивленіе статора w_1, то вышеуказанное уже не будетъ имѣть мѣсто. Въ этомъ случаѣ напряженіе у зажимовъ и противоэлектродвижущая сила слагаются въ равнодѣйствующую омическую потерю напряженія $i_1 \cdot w_1$.



Фиг. 332.

Раздѣлимъ, теперь, на w_1 всѣ стороны треугольника напряженія, составленнаго изъ векторовъ e_1, E_1 и $i_1 \cdot w_1$. Тогда получимъ треугольникъ OPQ, изображенный на фиг. 332, въ которомъ

$$OQ = e_1/w_1, \quad QP = E_1/w_1$$
$$\text{и } OP = i_1.$$

Мы можемъ себѣ представить затѣмъ, что напряженіе $i_1 \cdot w_1$ поглащается до двигателя, и что въ лишенномъ сопротивленія двигателѣ остается дѣйствующее напряженіе, равное по величинѣ и прямо противоположное E_1. Воспользовавшись меньшимъ напряженіемъ E_1 и соотвѣтственно уменьшеннымъ холостымъ токомъ OF, мы можемъ найти центръ P_1 круга Heyland'а, который проходитъ черезъ точку P, и діаметръ котораго FG перпендикуляренъ къ QP. Углы α и α_1 при этомъ равны другъ другу.

Этотъ кругъ, описанный изъ центра P_1 радіусомъ r_1, при различныхъ рабочихъ состояніяхъ не будетъ величиною постоянною. Но онъ можетъ намъ послужить для отысканія геометрическаго мѣста точки P. Координаты x_1 и y_1 точки P_1 и радіусъ r_1 связаны уравненіемъ круга съ координатами x и y точки P:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2. \quad \ldots \ldots \quad \text{(a)}$$

Пусть i_0 будетъ токъ при холостомъ ходѣ, и $r = \frac{i_0}{2\tau}$ соотвѣтствующій радіусъ въ діаграммѣ Heyland'а для статора безъ сопротивленія. Пусть, сверхъ того, на фиг. 332:

$$OM = m = i_0 + r.$$

Такъ какъ токи холостого хода при напряженіяхъ E_1 и e_1 относятся между собой какъ напряженія, то, соединивъ точки M и P_1, получимъ:

$$\frac{OF + FP_1}{m} = \frac{E_1}{e_1} = \frac{PQ}{OQ}.$$

Такъ какъ, кромѣ того, уголъ α равенъ углу α_1, то треугольники OP_1M и QPO подобны, т. е.

$$\frac{x_1}{m} = \frac{e_1/w_1 - y}{e_1/w_1}, \qquad \frac{y_1}{m} = \frac{x}{e_1/w_1}$$

или

$$x_1 = \frac{m \cdot e_1 - m \cdot y \cdot w_1}{e_1}, \qquad y_1 = \frac{m \cdot x \cdot w_1}{e_1}.$$

Далѣе, если r_1 радіусъ уменьшеннаго круга Heyland'а съ центромъ въ P_1, то:

$$OP_1^2 = x_1^2 + y_1^2 = m^2 \cdot \frac{r_1^2}{r^2}.$$

Откуда

$$r_1^2 = \frac{r^2}{m^2}(x_1^2 + y_1^2).$$

Введемъ найденныя для x_1, y_1 и r_1^2 выраженія въ уравненіе (a)

$$\text{и положимъ:} \quad m^2 - r^2 = s^2,$$
$$e_1^2 + s^2 \cdot w_1^2 = z^2.$$

Тогда, сдѣлавъ нѣкоторыя преобразованія, получимъ:

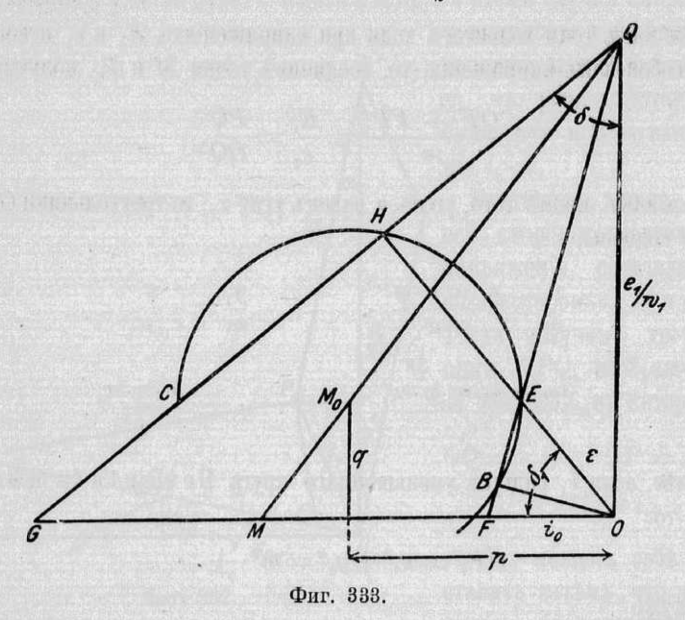
$$x^2 + y^2 - \frac{2m \cdot e_1^2}{z^2} \cdot x - \frac{2s^2 \cdot e_1 \cdot w_1}{z^2} \cdot y = -\frac{s^2 \cdot e_1^2}{z^2} \quad \ldots \quad \text{(b)}$$

Слѣдовательно, конечная точка P вектора первичнаго тока лежитъ на окружности круга съ координатами центра:

$$p = \frac{m \cdot e_1^2}{z^2}, \qquad q = \frac{s^2 \cdot e_1 \cdot w_1}{z^2}.$$

Этотъ кругъ съ центромъ M_0, представленный на фиг. 333, называется кругомъ Оссана. Его радіусъ R, на основаніи уравненія (b), равенъ:

$$R^2 = p^2 + q^2 - \frac{s^2 \cdot e_1^2}{z^2}.$$



Фиг. 333.

Подставивъ сюда вышеуказанныя значенія для p и q и принявъ во вниманіе, что $m^2 - s^2 = r^2$, найдемъ для радіуса круга Оссана выраженіе:

$$R = \frac{r \cdot e_1^2}{z^2}$$

Кругъ радіуса R даетъ возможность опредѣлить непосредственно уголъ сдвига фазъ φ_1, соотвѣтствующій данному первичному току i_1. Построить этотъ кругъ можно на основаніи слѣдующихъ соображеній. Пусть на фиг. 333, точка M по прежнему будетъ центромъ первоначальнаго круга Heyland'а съ діаметромъ FG, построеннаго для двигателя безъ сопро-

тивленія въ статорѣ; $OQ = e_1/w_1$, $OF = i_0$ и $OM = m$. Тогда, на основаніи выраженій для p и q и принимая во вниманіе, что $z^2 - e_1^2 = s^2 \cdot w_1^2$, получаемъ:

$$\frac{q}{m-p} = \frac{s^2 \cdot e_1 \cdot w_1 / z^2}{m - m \cdot e_1^2 / z^2} = \frac{e_1/w_1}{m}.$$

Какъ видно изъ фиг. 333, центръ круга Оссана лежитъ на соединительной линіи QM.

Примемъ во вниманіе сопротивленіе въ статорѣ, и при отсутствіи такового въ роторѣ положимъ, что OH изображаетъ токъ короткаго замыканія, а OB токъ при холостомъ ходѣ. Но при короткомъ замыканіи всѣ силовыя линіи подвергаются дѣйствію тока ротора, смѣщаются и направляются по обоимъ путямъ разсѣянія; при холостомъ ходѣ онѣ безпрепятственно проникаютъ въ роторъ. Въ обоихъ случаяхъ токъ въ статорѣ является намагничивающимъ токомъ, подобно тому, какъ это имѣетъ мѣсто въ реакціонной катушкѣ. Индуктируемая при короткомъ замыканіи электродвижущая сила, которая, независимо отъ масштаба, изображается отрѣзкомъ QH, отстаетъ, такимъ образомъ, на $90°$ отъ тока короткаго замыканія OH; точно также электродвижущая сила QB при холостомъ ходѣ отстаетъ на $90°$ отъ тока при холостомъ ходѣ OB. Отсюда вытекаетъ, что точки H и B лежатъ на полуокружности діаметра QO.

Такъ какъ токи короткаго замыканія при работѣ независимо отъ наличности или отсутствія сопротивленія въ статорѣ, и токи при холостомъ ходѣ пропорціональны электродвижущимъ силамъ, то:

$$\frac{OH}{OG} = \frac{QH}{QO}.$$

Далѣе, примемъ во вниманіе, что углы δ и δ_1 равны между собой и что треугольники OHG и QHO подобны. Тогда мы найдемъ, что уголъ OHG прямой, и что точки Q, H и G лежатъ на одной прямой. Отсюда слѣдуетъ, что точка короткаго замыканія H лежитъ на линіи QG. Такимъ же способомъ можно убѣдиться, что точка холостого хода B лежитъ на линіи QF.

Поэтому легко отыскать положенія точекъ H и B, которыя въ то же время лежатъ на окружности діаметра OQ. Кругъ Оссана проводится тогда черезъ точки H и B такъ, чтобы центръ его лежалъ на соединяющей линіи QM. Можно доказать, что точки пересѣченія C и E круга Оссана съ прямыми QG и QF находятся на одной высотѣ съ центромъ M_0, и что каждая группа точекъ O, B, C и O, E, H лежитъ на одной прямой.

Подобную діаграмму можно построить только для небольшихъ двигателей, такъ какъ у этихъ послѣднихъ омическое сопротивленіе оказываетъ сравнительно большое вліяніе. У большихъ двигателей съ хорошимъ коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія отрѣзокъ $OQ = \frac{e_1}{w_1}$ настолько великъ, что онъ уже не умѣщается на чертежѣ. Вліяніе сопротивленія статора выразится только въ томъ, что центръ круга перемѣщается почти перпендикулярно на разстояніе q вверхъ, а самый діаметръ будетъ почти равенъ $\frac{i_0}{\tau}$. Если, напримѣръ, какъ у 600 PS двигателя машиностроительнаго завода Эрликонъ [1])

$$e_1 = 1\,900, \quad i_0 = 36, \quad w_1 = 0{,}4, \quad \tau = 0{,}117,$$

то имѣемъ:

$$r = \frac{i_0}{2\tau} = 154,$$

$$m = i_0 + \frac{i_0}{2\tau} = 190,$$

$$s^2 = m^2 - r^2 = 12\,400$$

$$z^2 = e_1{}^2 + s^2 \cdot w_1{}^2 = 3\,610 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3.$$

Слѣдовательно, если мы у z^2 отбросимъ второй членъ, то сдѣлаемъ ошибку, равную только 2 на 3 600, и тогда $z^2 = e_1{}^2$. На основаніи стр. 528, тогда $p = m$ и, на основаніи стр. 528, $R = r$.

Радіусомъ остается въ этомъ случаѣ радіусъ первоначальнаго круга, а центръ его перемѣщается надъ центромъ первоначальнаго круга по перпендикуляру вверхъ на разстояніе:

$$q = \frac{s^2 \cdot e_1 \cdot w_1}{z^2} = 2{,}6.$$

Оссана также указалъ, какимъ образомъ графически на діаграммѣ можно получить вращающій моментъ, полезную мощность и скольженіе. Но сомнительно, чтобы тѣ математическія формулы, которыя кладутся въ основу построенія діаграммы, были столь просты, чтобы могли служить практическимъ цѣлямъ. Кругъ Оссана имѣетъ своею главною цѣлью показать, что съ увеличеніемъ потерь въ статорѣ улучшается коэффиціентъ мощности. Особенно это замѣтно только у двигателей со сравнительно большой потерей въ статорѣ.

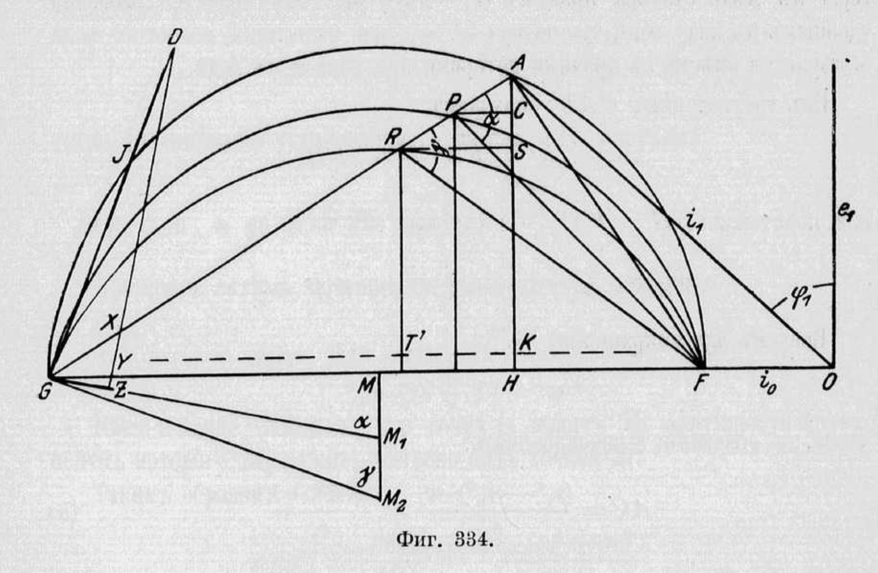
---

[1]) Ср. ETZ. 1900, № 52.

124. Наиболѣе удобный видъ круговой діаграммы.

Въ большинствѣ случаевъ на практикѣ примѣняютъ упрощенную діаграмму, предложенную самимъ Heyland'омъ, гдѣ потери въ статорѣ и роторѣ вычитаются изъ ординатъ первоначальной діаграммы. Дѣлаемая вслѣдствіе этого ошибка ничтожна по сравненію съ тѣмъ преимуществомъ, которое вытекаетъ изъ упрощенія діаграммы.

Въ предыдущей статьѣ уже указывалось, что радіусъ круга дѣйствительной діаграммы почти равенъ $i_0/2\tau$ и что центръ этого круга находится почти отвѣсно надъ центромъ первоначальнаго круга на небольшомъ разстояніи q отъ него. Но мы пренебрежемъ этимъ отрѣзкомъ q и примемъ,



Фиг. 334.

что кругъ дѣйствительной діаграммы совпадаетъ съ первоначальнымъ кругомъ. Векторъ первичнаго напряженія у зажимовъ совпадаетъ при этомъ съ осью ординатъ и первичная сообщаемая мощность на фиг. 334 будетъ:

$$P_1 = 3 \cdot e_1 \cdot i_1 \cdot cos\, \varphi_1 = 3 \cdot e_1 \cdot AH.$$

Отъ этой мощности, сообщаемой первичной цѣпи, отнимемъ потери въ мѣди первичной цѣпи.

Пусть на фиг. 334 потеря въ мѣди для одной фазы статора будетъ равна $e_1 \cdot AC$, въ роторѣ $e_1 \cdot CS$ и потеря при холостомъ ходѣ $e_1 \cdot KH$. Тогда

передаваемая ротору мощность, которая въ то же время будетъ мѣрою вращающаго момента, выразится:

$$P_2 = 3 \cdot e_1 \cdot CH.$$

Механическая мощность будетъ:

$$P = 3 \cdot e_1 \cdot SH,$$

и полезная мощность:

$$P_n = 3 \cdot e_1 \cdot SK = 3 \cdot e_1 \cdot RT'.$$

Чтобы удобнѣе было на фигурѣ найти точки C и S, отнесемъ весьма незначительную потерю $i_0^2 \cdot w_1$ къ потерямъ при холостомъ ходѣ; и за потерю въ мѣди статора примемъ $(i_1^2 - i_0^2) \cdot w_1$. Это является особенно удобнымъ въ виду того, что потеря $i_0^2 \cdot w_1$ при испытанiи холостого хода измѣряется вмѣстѣ съ прочими потерями при холостомъ ходѣ.

Изъ треугольника OAF получаемъ:

$$i_1^2 - i_0^2 = FA^2 + 2 i_0 \cdot FH,$$

или, подставляя $FH = FA^2 / \frac{i_0}{\tau}$ и умножая обѣ части на w_1, получаемъ:

$$(i_1^2 - i_0^2) \cdot w_1 = (1 + 2\tau) \cdot FA^2 \cdot w_1.$$

Введемъ для сокращенiя:

$$w' = (1 + 2\tau) \cdot w_1;$$

тогда, на основанiи вышесказаннаго:

$$AC = \frac{(i_1^2 - i_0^2) \cdot w_1}{e_1} = \frac{FA^2 \cdot w'}{e_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (a)$$

Черезъ C проводимъ прямую параллельно оси абсциссъ; эта прямая пересѣчетъ векторъ AG въ точкѣ P. Тогда на основанiи подобiя треугольниковъ FAG и ACP, получимъ:

$$\frac{AP}{AC} = \frac{i_0/\tau}{FA}$$

или, на основанiи предыдущаго равенства:

$$\frac{AP}{FA} = \frac{i_0 \cdot w'}{\tau \cdot e_1}.$$

Отношенiе $AP:FA$, равное котангенсу угла APF, является величиною постоянною, т. е. уголъ $APF = \alpha$ будетъ тоже величиною постоянною. Поэтому и уголъ GPF, равный $180° - \alpha$, тоже величина постоянная, т. е. точка P лежитъ на окружности, въ которой уголъ $GPF = 180° - \alpha$ есть вписанный уголъ, опирающiйся на хорду FG; центръ этой окружности находится ниже M на перпендикулярѣ къ FG, возставленномъ изъ M, при чемъ:

$$cotg\,\alpha = \frac{MM_1}{MG} = \frac{i_0 \cdot w'}{\tau \cdot e_1}.$$

Проведемъ затѣмъ черезъ точку S линiю параллельно оси абсциссъ; она пересѣчетъ векторъ AG въ точкѣ R. Положимъ далѣе, на основанiи равенствъ на стр. 518 и стр. 520:

$$i_2 = FA \cdot (1 + \tau) \cdot \frac{z_1}{z_2}, \quad w'' = w_2 \cdot \frac{z_1^2}{z_2^2} \cdot (1 + \tau_1)^2,$$

тогда, на основанiи установленнаго на стр. 531, получимъ:

$$CS = \frac{i_2^2 \cdot w_2}{e_1} = \frac{FA^2 \cdot w''}{e_1}.$$

Принимая, затѣмъ, во вниманiе равенство (a), находимъ:

$$AS = AC + CS = \frac{FA^2 \cdot (w' + w'')}{e_1}.$$

Какъ и выше, найдемъ, что точка R лежитъ на окружности круга, центръ котораго M_2 лежитъ отвѣсно подъ точкой M.

Такимъ образомъ условiе:

$$cotg\,\gamma = \frac{MM_2}{MG} = \frac{i_0 \cdot (w' + w'')}{\tau \cdot e_1}$$

будетъ выполнено.

При пускѣ въ ходъ, пока двигатель еще не въ движенiи, механическая мощность равна нулю, т. е. точки R и S лежатъ на оси абсциссъ. Въ этомъ случаѣ проведенный изъ точки G векторъ вовсе не пересѣкаетъ окружности, проведенной изъ центра M_2, т. е. онъ будетъ касаться ея. Если, слѣдовательно, провести GJ перпендикулярно къ GM_2, то J будетъ конечною точкою вектора первичнаго тока при пускѣ въ ходъ.

Чтобы опредѣлить, теперь, вообще скольженiе для рабочаго состоянiя, даннаго точкой A, опустимъ изъ любой точки D на векторѣ GJ перпен-

дикуляръ DZ на прямую GM_1. Онъ пересѣкаетъ векторъ GA въ точкѣ X, а ось абсциссъ въ точкѣ Y. Уголъ DYF равенъ тогда углу α, какъ углы съ перпендикулярными сторонами, и поэтому треугольники GYX и GPF подобны. Отсюда слѣдуетъ, что:

$$\frac{XY}{YG} = \frac{FP}{PG}.$$

Съ другой стороны, уголъ при D равенъ $\alpha - \gamma$, т. е. углу PFR. Слѣдовательно, треугольники GYD и RPF подобны, и

$$\frac{YG}{DY} = \frac{PR}{FP}.$$

Перемножая лѣвыя и правыя части послѣднихъ пропорцій, получаемъ:

$$\frac{XY}{DY} = \frac{PR}{PG} = \frac{CS}{CH}.$$

Но отношеніе $CS:CH$ представляетъ собой отношеніе потери въ роторѣ къ переданной ротору мощности.

Оно, слѣдовательно, на основаніи стр. 502, даетъ намъ какъ разъ относительное скольженіе, и мы получаемъ:

$$\frac{XY}{DY} = \frac{\mathfrak{s}}{\mathfrak{s}_1}.$$

Если перпендикуляръ DZ проведемъ такимъ образомъ, что длина DY равна 100 мм., то отрѣзокъ XY въ мм. даетъ непосредственно процентное скольженіе.

125. Практическій примѣръ.

Построимъ, теперь, діаграмму Heyland'а для практически выполненнаго двигателя и возьмемъ для этой цѣли двигатель машиностроительнаго завода Эрликонъ [1]). Двигатель этотъ построенъ мощностью въ 600 PS съ особенно низкимъ числомъ оборотовъ = 75 оборотамъ въ минуту. Это низкое число оборотовъ обусловливаетъ, понятно, соразмѣрно большое число полюсовъ и вслѣдствіе этого, какъ мы увидимъ въ ст. 126, соразмѣрно большое разсѣяніе. На основаніи этого обычное число 50 періодовъ у него

[1]) ETZ. 1900, № 52.

нельзя установить, а необходимо выбрать $\mathfrak{s}_1 = 22{,}5$. Тогда число паръ полюсовъ будетъ:

$$p = \frac{\mathfrak{s}_1}{n/60} = 18.$$

Діаметръ ротора въ круглыхъ числахъ равенъ 300 см., промежутокъ между тѣломъ ротора и статора составляетъ 0,2 см.

Напряженіе у зажимовъ статора съ соединеніемъ треугольникомъ $e_1 = 1\,900$ вольтъ. Сопротивленіе статора $w_1 = 0{,}4$ ома на фазу, сопротивленіе ротора $w_2 = 0{,}016$ ома на фазу. Обмотка статора помѣщается въ 324 каналахъ. Каждый каналъ заключаетъ въ себѣ 8 проволокъ, такъ что первичная обмотка состоитъ изъ $z_1 = 324 \cdot 8 = 2\,592$ проволокъ. У ротора голая проволочная обмотка умѣщается въ 432 каналахъ, и потому $z_2 = 432$. У статора и ротора обмотка катушечная. Токъ при холостой работѣ составляетъ въ проводникѣ сѣти 62 ампера, нормальный рабочій токъ тамъ же 170 амперъ. Слѣдовательно, соотвѣтственные фазовые токи мы получимъ путемъ дѣленія на $\sqrt{3}$.

Таблица.

$e_1 = 1\,900$	$i_0 = \frac{62}{\sqrt{3}} = 36$
$w_1 = 0{,}4$	
$w_2 = 0{,}016$	
$z_1 = 2\,592$	$i_1 = \frac{170}{\sqrt{3}} = 100$ (нормально).
$z_2 = 432$	

На основаніи опытовъ, произведенныхъ надъ этимъ двигателемъ, о которыхъ будетъ сказано въ слѣдующей статьѣ, коэффиціентъ разсѣянія при нормальномъ состояніи работы у двигателя равенъ:

$$\tau = 0{,}117 \text{ или } \tau_1 = \tau_2 = 0{,}057.$$

Поэтому для построенія діаграммы мы имѣемъ слѣдующія данныя:

$$OF = i_0 = 36$$

$$FG = \frac{i_0}{\tau} = \frac{36}{0{,}117} = 306.$$

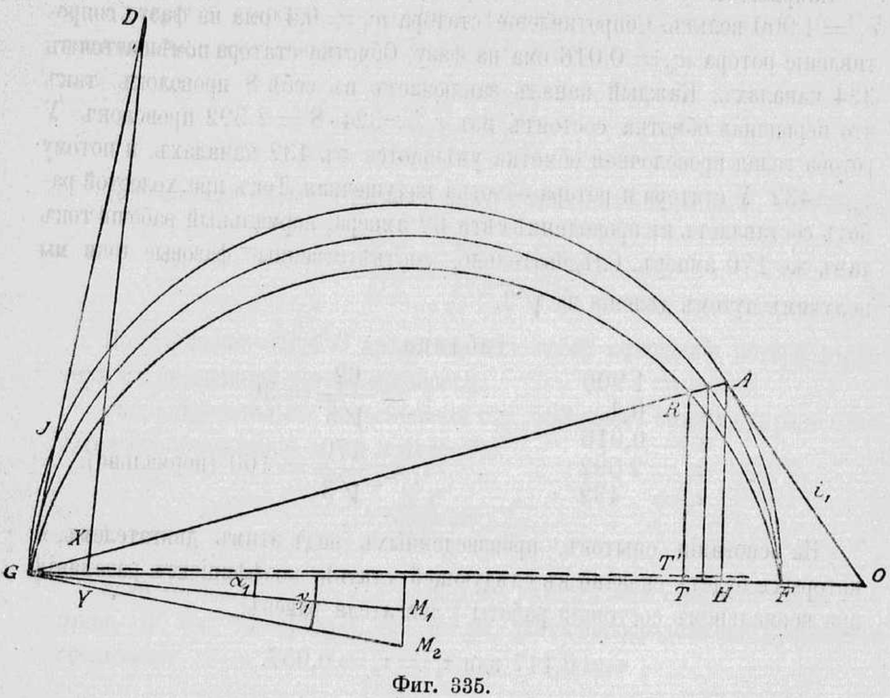
Далѣе, на основаніи стр. 532 и стр. 533,

$$w' = (1 + 2\tau) \cdot w_1 = 0{,}494; \quad w'' = \frac{z_1^2}{z_2^2} \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot w_2 = 0{,}64$$

$$ctg\,\alpha = \frac{i_0 \cdot w'}{\tau \cdot e_1} = 0{,}08, \quad ctg\,\gamma = \frac{i_0(w' + w'')}{\tau \cdot e_1} = 0{,}186.$$

Построимъ теперь, діаграмму, по даннымъ i_0, $\frac{i_0}{\tau}$, α и γ (фиг. 335). Такъ какъ полная потеря при холостомъ ходѣ у него $P_0 = 16\,000$ ваттъ, то разстояніе пунктирной горизонтальной прямой отъ оси абсциссъ будетъ составлять:

$$TT' = \frac{P_0}{3 \cdot e_1} = \frac{16\,000}{3 \cdot 1\,900} = 2{,}8 \text{ ампера.}$$



Фиг. 335.

1 мм. = 3 амперамъ

Опредѣлимъ, теперь, зависимость силы тока, коэффиціента полезнаго дѣйствія, коэффиціента мощности и числа оборотовъ отъ нагрузки, при чемъ подъ нагрузкою будемъ понимать полезный вращающій моментъ M_n. Этотъ послѣдній будетъ получаться теперь уже не такъ, какъ раньше, изъ полнаго вращающаго момента M_d и изъ передаваемой ротору мощности, а изъ полезной мощности P_n въ связи съ числомъ оборотовъ, согласно уравненію:

$$M_n = \frac{P_n}{2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot 9{,}81} \text{ клг-мтр.}$$

Такъ какъ полезная мощность выражается произведеніемъ $3 \cdot e_1 \cdot RT'$ гдѣ RT' необходимо измѣрять въ масштабѣ амперъ, то имѣемъ:

$$M_n = \frac{3 \cdot 1\,900 \cdot RT'}{2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot 9{,}81} = 5\,550 \cdot \frac{RT'}{n} \text{ клг-мтр.}$$

Этому полезному вращающему моменту соотвѣтствуетъ первичный токъ $i_1 = OA$ въ масштабѣ амперовъ:

$$i_1 = OA.$$

Такъ какъ ваттная слагающая первичнаго тока равна AH, то коэффиціентъ полезнего дѣйствія будетъ:

$$\eta = \frac{RT'}{AH}.$$

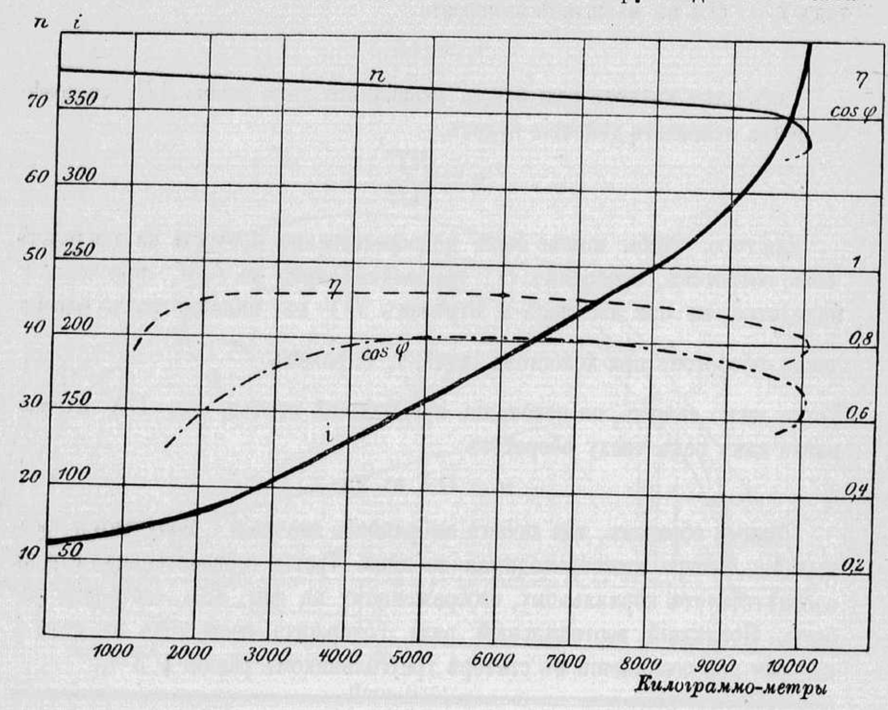
Для того, чтобы можно было непосредственно прочесть на діаграммѣ число оборотовъ, проводимъ DY перпендикулярно къ GM_1, при чемъ Y находится на оси абсциссъ и отрѣзокъ DY въ миллиметрахъ равенъ числу оборотовъ при холостомъ ходѣ, т. е. равенъ $\frac{\nu_1 \cdot 60}{p} = 75$ мм. Тогда легко понять, на основаніи предыдущей статьи, что DX въ мм. равно какъ разъ числу оборотовъ:

$$n = DX \text{ въ мм.}$$

Такимъ образомъ, для любого выбраннаго значенія i_1 получается чрезвычайно быстро нижеприводимая таблица. Третья горизонтальная строка соотвѣтствуетъ нормальному, изображенному на фиг. 335, состоянію работы. Послѣдній вертикальный рядъ содержитъ силы тока въ сѣти i, которая при соединеніи въ статорѣ треугольникомъ равна $\sqrt{3} \cdot i_1$.

$i_1 = OA$	RT'	AH	$\eta = \frac{RT'}{AH}$	$n = DX$ въ мм.	$\cos\varphi = \frac{AH}{OA}$	$M_n = 5550 \cdot \frac{RT'}{n}$	i
45	21,2	24,2	0,87	74,4	0,548	1 565	78
60	38,7	42,7	0,91	74	0,718	2 900	104
100	73,5	80,5	0,916	73	0,805	5 600	173
196,3	121,2	142,7	0,85	70,5	0,73	9 520	340
220	123,9	150	0,83	68,3	0,682	10 000	380
243	121,2	152,5	0,793	66,6	0,63	10 100	421
(284	113,5	150,2	0,753	64,8	0,57	9 700	490)

При помощи этой таблицы построены кривыя на фиг. 336, при чемъ полезный вращающій моментъ отложенъ по оси абсциссъ. Какъ видимъ, наибольшій вращающій моментъ равенъ 10 000 клг-мтр, въ то время, какъ вращающій моментъ при нормальной работѣ составляетъ около 5 600 клг-мтр. Слѣдовательно, двигатель можетъ быть перегруженъ вдвое, при чемъ сила тока въ проводникѣ сѣти возрастетъ отъ нормальныхъ 173 амперъ до 421 амперъ. При болѣе сильной нагрузкѣ двигатель оста-



Фиг. 336.

навливается. Поэтому величины, получаемыя изъ лѣвой части, діаграммы на фиг. 335, не будутъ дѣйствительными или годятся скорѣе только для періода пуска въ ходъ.

Числа оборотовъ, при нормальной работѣ равно 73, что соотвѣтствуетъ скольженію 2 на 75 или 2,7%. При болѣе сильной нагрузкѣ число оборотовъ постоянно будетъ падать и достигаетъ при наибольшей нагрузкѣ величины 66,6.

Кривыя коэффиціента полезнаго дѣйствія и коэффиціента мощности поднимаются при возрастаніи нагрузки сравнительно быстро вверхъ, достигаютъ при нормальной нагрузкѣ своего максимума и затѣмъ при перегрузкѣ медленно снова падаютъ. Необходимо замѣтить, что обѣ кривыя вблизи своего максимума на довольно значительномъ протяженіи идутъ параллельно оси абсциссъ. Можно было бы подумать, что при 600 PS двигателѣ можно вообще получить только полный коэффиціентъ полезнаго дѣйствія, равный въ круглыхъ числахъ 92 %, и коэффиціентъ мощности $\cos\varphi = 0{,}81$. Но въ слѣдующей же статьѣ мы увидимъ, что особенно низкое число оборотовъ нашего двигателя вызываетъ большое разсѣяніе. Вслѣдствіе этого сдвигъ фазъ будетъ сравнительно великъ и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія менѣе совершенъ. Нормальный двигатель той же фирмы на ту же мощность и 370 оборотовъ въ минуту при 50 періодахъ давалъ, напримѣръ, $\cos\varphi = 0{,}92$, $\eta = 0{,}95$ и скольженіе въ 1,5%.

Въ слѣдующей статьѣ мы поставимъ себѣ задачей отвѣтить на вопросъ, какъ опредѣлить, теперь, опытнымъ путемъ коэффиціентъ разсѣянія τ, эту основную, столь важную, величину для работы двигателя, и отчего зависятъ его размѣры.

126. Коэффиціентъ разсѣянія.

Если у ротора будетъ фазовая обмотка, то опытное опредѣленіе коэффиціента разсѣянія τ можетъ быть произведено слѣдующимъ образомъ. Первичное напряженіе у зажимовъ e_1 сообщаютъ статору и измѣряютъ напряженіе у зажимовъ при разомкнутой обмоткѣ ротора. Трехфазный двигатель уподобляется тогда неподвижному ненагруженному трансформатору, и напряженія у зажимовъ e_1 и e_2 должны быть тогда пропорціональны числу проволокъ z_1 и z_2. При этомъ, понятно, предполагаются одинаковыя схемы включенія ротора и статора. При неодинаковыхъ схемахъ включенія полное напряженіе необходимо было бы раздѣлить на извѣстный множитель $\sqrt{3}$, а также принять во вниманіе различіе коэффиціентовъ k (ср. стр. 381 и стр. 505).

Мы ожидаемъ на зажимахъ ротора напряженіе $e_1 \cdot z_2/z_1$. Но если, вслѣдствіе разсѣянія, не всѣ силовыя линіи, создаваемыя статоромъ, проникаютъ въ роторъ, то вторичное напряженіе e_2 меньше теоретическаго $e_1 \cdot z_2/z_1$. Отношеніе $\frac{e_1 \cdot z_2}{z_1} : e_2$ даетъ намъ отношеніе числа силовыхъ линій, передаваемыхъ ротору, къ полному числу силовыхъ линій, создаваемыхъ статоромъ. При холостомъ ходѣ, когда N силовой потокъ въ роторѣ и N_{s_1} первичное разсѣяніе, имѣемъ:

$$\frac{N}{N_{s_1}} = \frac{1}{\tau_1}.$$

Откуда

$$\frac{N+N_{s_1}}{N}=1+\tau_1$$

Слѣдовательно, получаемъ:

$$1+\tau_1=\frac{e_1\cdot z_2/z_1}{e_2}.$$

Подобнымъ же образомъ мы можемъ присоединить къ ротору внѣшній источникъ трехфазнаго тока и при этомъ измѣрять напряженіе e_1 у зажимовъ статора. Если e_2 будетъ напряженіе, прилагаемое къ ротору, то $e_2\cdot z_1/z_2$ величина напряженія статора въ случаѣ, если всѣ силовыя линіи, создаваемыя въ роторѣ, проникнутъ и въ статоръ. Если же будетъ существовать разсѣяніе, то напряженіе e_1, измѣренное у статора, будетъ меньше теоретическаго, и тогда будемъ имѣть:

$$1+\tau_2=\frac{e_2\cdot z_2/z_1}{e_1}$$

Измѣреніе должно быть произведено съ очень строгой точностью. При этомъ не является необходимымъ, чтобы показанія вольтметровъ ротора и статора точно совпадали. Если при обоихъ измѣненіяхъ вольтметры ротора и статора не перепутывать и не перемѣнять, то изъ двухъ величинъ τ_1 и τ_2 одну при измѣреніи получаютъ нѣсколько больше, другую нѣсколько меньше, такимъ образомъ ошибка при опредѣленіи полнаго коэффиціента разсѣянія τ пропадаетъ. Полный коэффиціентъ τ опредѣляется изъ τ_1 и τ_2 согласно стр. 517.

Этотъ способъ опредѣленія коэффиціента разсѣянія имѣетъ за собою простоту и наглядность, такъ какъ онъ основанъ на непосредственномъ опредѣленіи коэффиціентовъ τ_1 и τ_2. Но онъ приводитъ, тѣмъ не менѣе, къ неточнымъ результатамъ, такъ какъ коэффиціентъ разсѣянія въ дѣйствительности не представляетъ собою, какъ мы до сихъ поръ полагали, постоянной величины. При большой силѣ тока число разсѣивающихся силовыхъ линій и насыщеніе выступающихъ частей зубцовъ очень значительны. Слѣдовательно, сопротивленіе пути утечки при работѣ больше, чѣмъ при холостомъ ходѣ. Поэтому отношеніе сопротивленія воздушнаго слоя къ сопротивленію пути утечки при работѣ будетъ меньше, чѣмъ при холостомъ ходѣ. Такъ какъ величины τ_1 и τ_2 становятся, поэтому, также меньше, то при нагрузкѣ машина работаетъ болѣе совершенно, чѣмъ можно было полагать согласно вышеопредѣленному значенію τ.

Этимъ собственно, строго говоря, ограничивается правильность діаграммы Heyland'а. Она строго справедлива только для одного опредѣленнаго состоянія работы, при которомъ сопротивленіе пути разсѣянія соотвѣтствуетъ принятымъ значеніямъ τ_1 и τ_2. Слѣдовательно, если это возможно, необходимо для различныхъ состояній работы вычерчивать и различныя діаграммы, но важно, главнымъ образомъ, опредѣлить коэффиціентъ разсѣянія для нормальнаго состоянія работы. Это можно получить, если замкнуть роторъ на короткое и измѣрить токъ въ статорѣ J_0 при неподвижномъ роторѣ. Если принять сопротивленіе ротора незначительнымъ, то токъ при короткомъ замыканіи $J_0=OJ$ совпадетъ на фиг. 330 съ векторомъ OG. Такимъ образомъ получаемъ непосредственно $OG=i_0+\frac{i_0}{\tau}=J_0$.

Кромѣ того измѣряютъ токъ при холостомъ ходѣ и получаютъ:

$$J_0=i_0+\frac{i_0}{\tau}$$

или

$$\tau=\frac{i_0}{J_0-i_0}.$$

Если произвести отсчетъ тока при холостой работѣ при обычномъ напряженіи, то сила тока получится чрезмѣрно большою. Кромѣ того, при этомъ выступающія части зубцовъ будутъ очень насыщены. Слѣдовательно, если первый методъ давалъ величину τ, правильную только для крайней правой части діаграммы, то полученная теперь величина вѣрна только для крайней лѣвой части. Поэтому нужно приложить къ статору такое напряженіе, чтобы при короткомъ замыканіи черезъ статоръ проходилъ нормальный рабочій токъ. Тогда потокъ утечки во время короткаго замыканія таковъ же, что при нормальной работѣ, стало быть, и отношеніе магнитныхъ сопротивленій поля утечки и полезнаго поля таково же, что и при нормальной работѣ. Этимъ путемъ не получаютъ, конечно, величину τ для всѣхъ случаевъ пригодную, но по крайней мѣрѣ величину τ для нормальнаго состоянія работы. Понятно, въ вышеуказанное уравненіе для i_0 необходимо ввести намагничивающій токъ при уменьшенномъ напряженіи.

Примѣръ изъ практики поможетъ намъ еще болѣе уяснить этотъ методъ, и мы вернемся къ нашему прежнему двигателю. Опытныя данныя заимствованы изъ ETZ, № 52 за 1900. Для опредѣленія величины τ роторъ былъ замкнутъ на короткое, при чемъ статору сообщалось не нормальное

напряженіе сѣти въ 1 900 вольтъ, но послѣдовательно напряженія въ 600 и 390 вольтъ. При этомъ токи при короткомъ замыканіи на проводникъ сѣти получались равными 200 и 110 амперамъ, а токи при короткомъ замыканіи на фазу $J_0 = 200/\sqrt{3} = 116$ и $110/\sqrt{3} = 63,7$ амперамъ.

Чтобы опредѣлить отсюда соотвѣтствующія значенія τ для обоихъ состояній работы, найдемъ токи при холостомъ ходѣ, которые должны были бы быть при напряженіи въ 390 и 600 вольтъ. Эти токи холостого хода, въ сущности, являются намагничивающими токами и служатъ для намагничиванія воздушнаго слоя между статоромъ и роторомъ. Поэтому они пропорціональны порождаемому магнитному потоку, стало быть, противоэлектродвижущей силѣ E_1, они относятся между собою какъ напряженія у зажимовъ. Если же мы знаемъ токъ при холостой работѣ для какого-нибудь опредѣленнаго напряженія у зажимовъ, то мы можемъ отсюда опредѣлить токи при холостомъ ходѣ для другихъ напряженій у зажимовъ.

Согласно этому получаемъ слѣдующую таблицу:

e_1	i_0	J_0 (измѣренное)	$\tau = \frac{i_0}{J_0 - i_0}$
1 900	36 (измѣренное)	—	—
600	$36 \cdot \frac{600}{1\,900} = 11,4$	116	0,109
390	$36 \cdot \frac{390}{1\,600} = 7,4$	63,7	0,131

Мы видимъ ясно, что съ возрастаніемъ силы тока величина τ становится меньше, т. е. что коэффиціенты разсѣянія τ_1 и τ_2, согласно таблицѣ на стр. 525, будутъ также меньше. Причина этого опять въ томъ, что съ возрастаніемъ силы тока потокъ утечки, вслѣдствіе насыщенія выступающихъ частей зубцовъ, почти не увеличивается. Слѣдовательно, процентъ потери на утечку будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ сильнѣе будетъ токъ въ статорѣ и роторѣ.

Величину τ для нормальнаго состоянія работы, стало быть, для фазоваго тока $i_1 = 100$ амперамъ, мы найдемъ интерполированіемъ между величинами

$$J_0 = 116 \qquad \tau = 0,109$$
$$63,7 \qquad 0,131$$

Для силы въ 100 амперъ мы получимъ:

$$\tau = 0,117.$$

Изъ уравненія для τ, на стр. 517, мы имѣемъ, если положимъ $\tau_1 = \tau_2$:

$$\tau = 2\tau_1 + \tau_1^2$$

или, подставляя значенія для $\tau = 0,117$,

$$\tau_1 = \tau_2 = 0,057.$$

Эта величина по отношенію къ мощности двигателя не является выгодною, однако, въ случаѣ большого числа полюсовъ она удовлетворительна.

Третій путь для опытнаго опредѣленія діаграммы состоитъ въ томъ, что измѣняютъ нагрузку ротора или при заторможенномъ на мѣстѣ роторѣ измѣняютъ пусковой реостатъ въ цѣпи ротора. Затѣмъ измѣряютъ напряженіе сѣти e, токъ въ сѣти i и при помощи одного или нѣсколькихъ ваттметровъ сообщаемую первичную мощность P_1. Тогда имѣемъ:

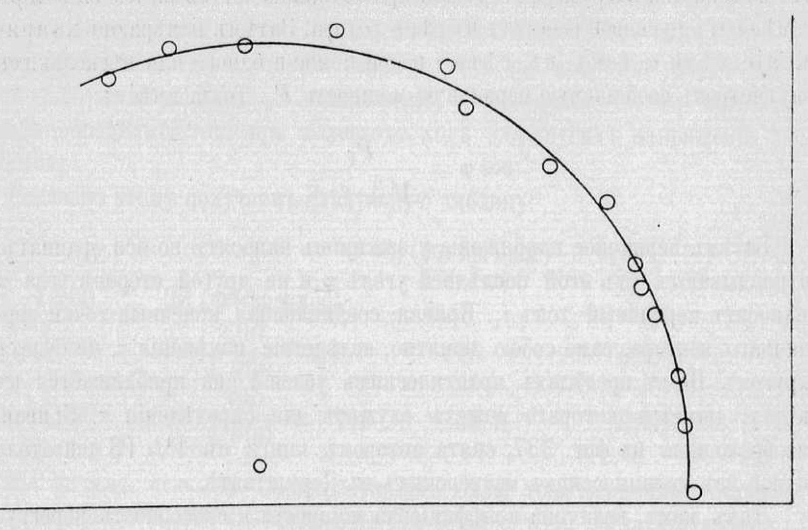
$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot e \cdot i}.$$

Затѣмъ первичное напряженіе у зажимовъ наносятъ по оси ординатъ, откладываютъ отъ этой послѣдней уголъ φ и на другой сторонѣ угла φ наносятъ первичный токъ i_1. Кривая, соединяющая конечныя точки первичнаго вектора, само собою понятно, вслѣдствіе измѣненія τ, не будетъ кругомъ. Но въ предѣлахъ практическихъ условій она приближается къ кругу, діаметръ котораго можетъ служить для опредѣленія τ. Кривая, изображенная на фиг. 337, снята авторомъ книги съ 1¼ PS двигателя одной изъ механическихъ мастерскихъ въ Дармштадтѣ.

Такъ какъ величина коэффиціента мощности и способность перегружаться зависятъ непосредственно отъ коэффиціента разсѣянія τ, то первою задачею при построеніи двигателя трехфазнаго тока является достиженіе наивозможно меньшей величины для τ, стало быть, наивозможно меньшаго разсѣянія. Отсюда тотчасъ же видно, что помѣщеніе проволокъ въ закрытыхъ каналахъ вслѣдствіе незначительнаго при этомъ сопротивленія пути утечки, невыгодно. Особенно вреднымъ это становится тогда, когда каналы удалены на значительное разстояніе отъ воздушнаго слоя. Если же, наоборотъ, замыкающія части между двумя сосѣдними зубцами очень тонки, т. е. каналы непосредственно примыкаютъ къ воздушному слою, то противъ закрытыхъ каналовъ врядъ ли будетъ возможно что-либо возразить. Наиболѣе выгодными были бы, конечно, совершенно открытые каналы, такъ какъ въ этомъ случаѣ, во-первыхъ, магнитное сопротивленіе пути утечки было бы наибольшимъ, а во-вторыхъ удобнѣе устроить обмотку. Но

такіе каналы вызывали бы неравномѣрное распредѣленіе магнитнаго потока въ междужелѣзномъ пространствѣ и потому повышеніе намагничивающаго тока.

Но во всякомъ случаѣ на каждую индуктирующуюся сторону катушки необходимо устраивать по нѣсколько каналовъ, чтобы потокъ утечки, порождаемый ампервитками одного канала, былъ по возможности слабѣе. Уменьшеніе разсѣянія при увеличеніи числа каналовъ на индуктирующуюся сторону катушки вызывается не столько удлиненіемъ пути утечки, сколько уменьшеніемъ поперечнаго сѣченія пути. Такъ какъ съ увеличеніемъ числа каналовъ увеличивается и число зубцовъ, то линіи потока разсѣянія, обни-



Фиг. 337.

мающія всѣ витки индуктирующейся стороны катушки, при бо́льшемъ числѣ каналовъ выходятъ изъ меньшей поверхности зубца, чѣмъ при менѣе значительномъ числѣ каналовъ. Понятно, идти въ этомъ направленіи особенно далеко не представляется возможнымъ, такъ какъ при большомъ числѣ каналовъ пространство, занимаемое изоляціей, будетъ очень велико. Поэтому ограничиваются тѣмъ, что у статора на каждую индуктирующуюся сторону катушки устраиваютъ отъ 3—5 каналовъ, а у ротора отъ 4—7. На основаніи этихъ же соображеній предпочитаютъ устраивать двигатели трехфазнаго тока большого діаметра, но съ небольшою длиною якоря, такъ какъ при большомъ діаметрѣ, стало быть, при сравнительно большомъ полюсномъ дѣленіи, гораздо легче распредѣлить проволоки одной индукти-

рующейся стороны катушки на нѣсколько каналовъ. Но, конечно, машины съ большимъ діаметромъ и небольшою длиною якоря будутъ значительно дороже. Это ясно будетъ изъ того простого соображенія, что мощность такой машины, безъ особыхъ затратъ на это, можетъ значительно возрасти, если при построеніи взять якорь нѣсколько длиннѣе. Кромѣ того, при большомъ полюсномъ дѣленіи вліяніе разсѣянія потока съ торцевой поверхности будетъ опять-таки чрезвычайно велико.

Вторымъ средствомъ уменьшенія коэффиціента разсѣянія τ является суженіе междужелѣзнаго пространства. Такъ какъ у коэффиціента $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2$ послѣдній членъ, вслѣдствіе своей незначительности, почти пропадаетъ, то, согласно опредѣленію τ_1 и τ_2 на стр. 517, величина τ прямо пропорціональна величинѣ воздушнаго слоя [1]).

Интересно, теперь, прослѣдить, какое вліяніе оказываетъ величина воздушнаго слоя на коэффиціентъ полезнаго дѣйствія двигателя. Понятно, при этомъ нельзя довольствоваться однимъ какимъ-либо двигателемъ и для производства опыта постепенно стачивать поверхности ротора или статора, такъ какъ этимъ путемъ мы будемъ увеличивать не только воздушный слой, но одновременно и магнитное сопротивленіе части, замыкающей два сосѣдніе зубца.

Мы будемъ лучше сравнивать два двигателя съ однимъ и тѣмъ же устройствомъ каналовъ, но съ различнымъ воздушнымъ слоемъ. Чѣмъ тоньше будетъ воздушный слой, тѣмъ меньше будутъ размѣры τ, тѣмъ значительнѣе будетъ наибольшій коэффиціентъ мощности, согласно уравненію:

$$(\cos\varphi)_{max} = \frac{1}{2\tau + 1}.$$

Равнымъ образомъ при уменьшеніи воздушнаго слоя будетъ, понятно, меньше и токъ при холостой работѣ, такъ какъ теперь для созданія магнитнаго потока уже будетъ достаточенъ болѣе слабый намагничивающій токъ. Наоборотъ, наибольшій вращающій моментъ выражается наибольшей ординатой круга, слѣдовательно, величиною i_0/τ. Такъ какъ это отношеніе для обоихъ разсматриваемыхъ двигателей одинаково, то отсюда вытекаетъ, что наибольшій вращающій моментъ не зависитъ отъ размѣровъ воздушнаго слоя. При этомъ, конечно, предполагается, что всѣ остальныя величины у обоихъ двигателей вполнѣ одинаковы.

Большое вліяніе на размѣры коэффиціента разсѣянія τ имѣетъ выбран-

---

[1]) Ср. Behrend, «The induktion motor», а также Behrend, ETZ. 1904, стр. 59.

ное число періодовъ. Чтобы это выяснить, разсмотримъ два двигателя, индукторные остовы которыхъ одинаковы, имѣютъ одно и то же число каналовъ, оба расчитаны на одно и то же напряженіе, мощность и число оборотовъ. Но пусть одинъ обмотанъ для 50 періодовъ, а другой для 30. Оба двигателя должны быть одинаковы по отношенію къ использованію поперечнаго сѣченія каналовъ, по числу амперъ на квадр. миллиметръ и по числу ампервитковъ на сантиметръ окружности.



Фиг. 338.

Тогда, если пренебречь разницей въ значеніяхъ $cos\,\varphi$ у обоихъ двигателей, получаемъ, что при одинаковой мощности и напряженіи сила тока въ обоихъ случаяхъ будетъ одна и та же. Слѣдовательно, если число ампервитковъ на сантиметръ окружности будетъ одинаковымъ, то въ обоихъ случаяхъ мы имѣемъ одно и то же число проволокъ и при одинаковомъ



Фиг. 339.

числѣ каналовъ одно и то же число проволокъ въ каналѣ. Но по числу паръ полюсовъ двигатели будутъ разниться согласно уравненію

$$p = \frac{\sim_1}{n_1/60}.$$

Слѣдовательно, при одинаковомъ числѣ оборотовъ мы должны двигателю съ 50 періодами дать число полюсовъ въ 5 : 3 раза больше, чѣмъ у двигателя съ 30 періодами. Такъ какъ окружность у обоихъ одинакова, то полюсныя дѣленія относятся между собою, какъ 3 : 5. Положимъ, у перваго двигателя (фиг. 338) на каждую индуктирующуюся сторону

катушки приходится по 3 канала или на полюсное дѣленіе 9 каналовъ. Тогда у второго двигателя вмѣсто этого будетъ 5 каналовъ на индуктирующуюся сторону катушки и 15 каналовъ на полюсное дѣленіе (фиг. 339). Слѣдовательно, числа проволокъ на индуктирующуюся сторону катушки пропорціональны 3 : 5.

Затѣмъ имѣемъ:

$$e_1 = k \cdot N_0 \cdot \sim_1 \cdot z'_1 \cdot 10^{-8}.$$

Полагая N_0 въ круглыхъ числахъ равнымъ передаваемому магнитному потоку $B_{среднее} \cdot Q_l$ и $\sim_1$ въ круглыхъ числахъ равнымъ $p \cdot n/60$ и подставляя все это въ предыдущее уравненіе, получаемъ:

$$e_1 = k \cdot B_{среднее} \cdot Q_l \cdot p \cdot \frac{n}{60} \cdot z_1{}' \cdot 10^{-8}.$$

При этомъ $Q_l \cdot p$, представляетъ собою половину внутренней боковой поверхности статора, одинаково для обоихъ двигателей. Такъ какъ, затѣмъ, величины e_1, k, n и $z_1{}'$ одинаковы для обоихъ случаевъ, то отсюда слѣдуетъ, что оба двигателя работаютъ съ одинаковою плотностью магнитнаго потока $B_{среднее}$.

При одинаковой же индукціи потеря на гистерезисъ пропорціональна числу періодовъ. Послѣдняя у двигателя съ 50 періодами въ 5 : 3 раза больше, чѣмъ у двигателя съ 30 періодами.

Далѣе имѣемъ, что для созданія одной и той же индукціи у обоихъ двигателей необходимо одно и то же число проволокъ на индуктирующуюся сторону катушки. Такъ какъ у индуктирующихся сторонъ катушекъ перваго двигателя проволокъ въ 3 : 5 раза меньше, то токи при холостой работѣ относятся между собою, какъ 5 : 3, т. е. какъ число періодовъ [1]).

Труднѣе выразить соотношенія, если принять во вниманіе только коэффиціентъ разсѣянія въ обоихъ случаяхъ. Мы могли бы, пожалуй, предположить, что магнитное сопротивленіе поля утечки у обоихъ двигателей осталось одинаковымъ. Но на самомъ дѣлѣ мы получимъ при 50 періодахъ, соотвѣтственно меньшей ширинѣ полюса, сопротивленіе полезнаго поля въ отношеніи 5 : 3 большее, чѣмъ при 30 періодахъ. Такъ какъ теперь τ, согласно стр. 517, пропорціонально сопротивленію воздушнаго слоя, то отсюда слѣдуетъ, что оно прямо пропорціонально числу періодовъ. Болѣе низкое число періодовъ, обусловливаетъ, слѣдовательно, болѣе незначительные раз-

[1]) У одного и того же двигателя, при предположеніи одинаковаго напряженія у зажимовъ, токи при холостомъ ходѣ обратно-пропорціональны числу періодовъ.

мѣры τ, т. е. значительно большій коэффиціентъ мощности. Behrend подтвердилъ этотъ результатъ опытнымъ путемъ. Но все же сомнительно, чтобы его опыты имѣли рѣшающее значеніе, такъ какъ нельзя поручиться, дѣйствительно ли сопротивленіе поля утечки въ обоихъ случаяхъ осталось одинаковымъ. Во всякомъ случаѣ, утечка въ выступающихъ лобовыхъ частяхъ обмотки, вслѣдствіе болѣе значительнаго числа торцевыхъ соединеній на фиг. 339, будетъ больше, чѣмъ на фиг. 338. Наоборотъ, утечка въ частяхъ, замыкающихъ два сосѣдніе зубца, на фиг. 339, больше, такъ какъ та часть потока утечки, которая окружаетъ всю индуктирующуюся часть катушки, должна проходить теперь 5 вмѣсто 3 каналовъ. Еще вопросъ, уравновѣсится ли увеличеніе разсѣянія выступающихъ частей обмотки уменьшеніемъ разсѣянія въ зубцахъ.

Интересно, что оба разсматриваемые двигателя обладаютъ почти одинаковой способностью къ перегрузкѣ. Хотя у двигателя съ бо̀льшимъ числомъ полюсовъ и большій намагничивающій токъ, но и большій коэффиціентъ разсѣянія τ. Вслѣдствіе этого у него радіусъ круга діаграммы и наибольшій вращающій моментъ почти такихъ же размѣровъ, что и у двигателя съ меньшимъ числомъ періодовъ.

Слѣдовательно, существенная разница у обоихъ двигателей состоитъ въ различномъ у нихъ намагничивающемъ токѣ и различномъ коэффиціентѣ мощности.

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ.

---

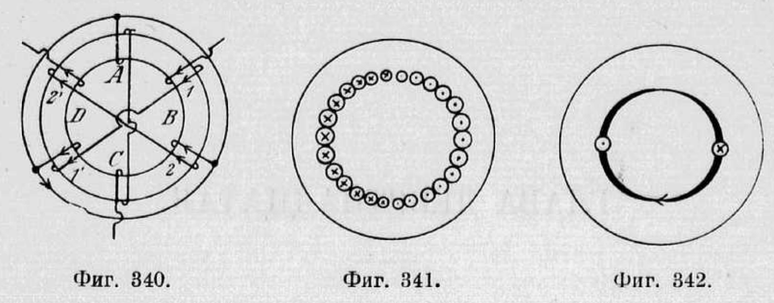
127. Разложеніе перемѣннаго возбужденія однофазнаго двигателя на вращающіяся возбужденія.—128. Круговая діаграмма для однофазнаго двигателя.—129. Круговая діаграмма для однофазнаго двигателя, основанная на теоріи поперечнаго силового потока.—130. Однофазные коллекторные двигатели.—131. Двигатель перемѣннаго тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.—132. Репульсіонный двигатель.—133. Двигатель Eichberg—Latour'a.

127. Разложеніе перемѣннаго возбужденія однофазнаго двигателя на вращающіяся возбужденія.

Если разомкнуть одинъ изъ проводовъ, подводящихъ токъ къ вращающемуся трехфазному двигателю, то двигатель продолжаетъ вращаться дальше въ томъ же направленіи, но уже какъ двигатель однофазный. На фиг. 340, индуктирующіяся стороны катушекъ 1 и 2 представляютъ собою какъ бы одну проходимую токомъ въ одномъ направленіи сторону катушки шириною въ $^2/_3$ полюснаго дѣленія. При разомкнутой обмоткѣ ротора токъ статора создаетъ измѣняющійся въ зависимости отъ времени магнитный потокъ, ось котораго въ пространствѣ неподвижна и на фигурѣ пронизываетъ роторъ вертикально сверху внизъ. Середина полюсовъ тогда находится постоянно у A и C, а нейтральная ось у B и D. Вначалѣ кажется поразительнымъ, что этимъ перемѣннымъ полемъ создается вращающій моментъ, и что направленіе вращающаго момента опредѣляется произвольно выбраннымъ первоначальнымъ направленіемъ вращенія.

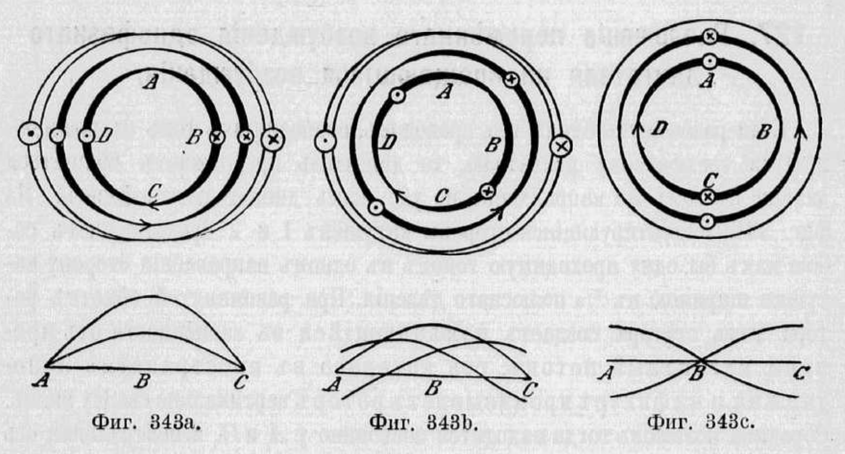
По предложенію Феррариса, это перемѣнное поле разлагаютъ на два вращающіяся другъ другу навстрѣчу поля. Мы пойдемъ немного дальше и станемъ разлагать не только магнитный потокъ, но также и первичные

ампервитки на два ряда ампервитковъ, вращающихся въ противоположныя стороны[1]). При этомъ мы должны принять, что проволоки вдоль окружности распредѣляются синусоидально, что на фиг. 341 представлено различною величиною каналовъ. Теоретически это привело бы, конечно, къ безконечно большому числу безконечно тонкихъ проволокъ. Такое синусоидально распредѣленное возбужденіе мы можемъ изобразить въ представленномъ на фиг. 342 видѣ.



Фиг. 340. Фиг. 341. Фиг. 342.

Стрѣлка здѣсь указываетъ не на то, что обмотка вращается, а на то, что въ неподвижныхъ, равномѣрно расположенныхъ вдоль окружности, виткахъ передвигается синусоидальное распредѣленіе тока. Въ этомъ смыслѣ дѣйствительно приходимъ къ понятію о двигателѣ съ вращающимся токомъ[2]), тогда какъ до сихъ поръ была рѣчь о двигателяхъ съ вращающимся полемъ.



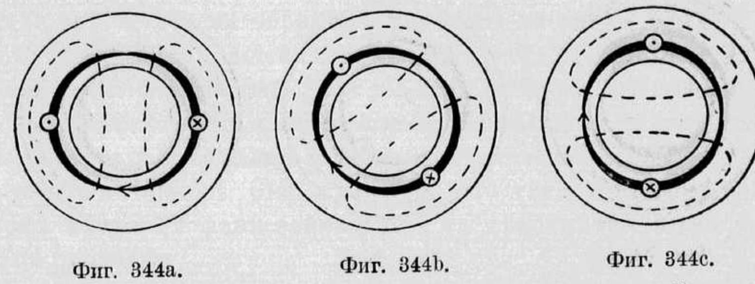
Фиг. 343а. Фиг. 343b. Фиг. 343с.

[1]) Въ дальнѣйшемъ мы вмѣстѣ съ авторомъ будемъ называть эти теоретически вращающіеся ампервитки, для краткости, «вращающимися возбужденіями». Ред.

[2]) т. е. къ трехфазному току (Drehstrom).

При нашемъ предположеніи дѣйствіе перемѣннаго возбужденія въ каждый моментъ и въ каждомъ мѣстѣ строго равно дѣйствію двухъ синусоидальныхъ возбужденій, вращающихся въ противоположныхъ другъ другу направленіяхъ, и изъ которыхъ каждое по силѣ равно половинѣ того, какое имѣютъ дѣйствительные ампервитки въ моменты своего максимума. На фиг. 343а, дѣйствительный токъ въ статорѣ обладаетъ своею наибольшею силою. Въ этотъ моментъ вращающіяся индуктирующія стороны катушекъ, проходимыя токомъ въ одномъ направленіи, покрываютъ другъ друга, и дѣйствіе ихъ складывается. Онѣ, слѣдовательно, равнозначущи съ изображенными снаружи неподвижными ампервитками, которые въ данный моментъ обладаютъ максимумомъ.

Черезъ $^1/_8$ періода дѣйствительный токъ въ статорѣ будетъ равенъ $i_{max} \cdot \sin 45^\circ = 0{,}707 \cdot i_{max}$. Тогда мы находимъ, что на фиг. 343b вращающіеся ампервитки у A и C уравновѣшиваютъ другъ друга. Сложеніе



Фиг. 344а. Фиг. 344b. Фиг. 344с.

Сопутствующій магнитный потокъ при холостомъ ходѣ.

обѣихъ синусоидъ въ нижней части фигуры даетъ синусоиду, максимумъ которой находится опять у B. Всѣ ординаты уменьшены по сравненію съ фиг. 343а въ отношеніи $0{,}707 : 1$, такъ что магнитное дѣйствіе вращающихся возбужденій снова равно дѣйствію дѣйствительныхъ ампервитковъ.

То же самое получается и черезъ $^1/_8$ періода, гдѣ дѣйствительный токъ въ роторѣ становится равнымъ нулю (фиг. 343с). Въ самомъ дѣлѣ, теперь индуктирующіяся стороны катушекъ вращающихся возбужденій, проходимыя токомъ въ противоположномъ направленіи, перекрываютъ другъ друга и взаимно уничтожаютъ свои магнитныя дѣйствія.

Разсмотримъ теперь абсолютно холостой ходъ двигателя съ замкнутымъ якоремъ съ клѣткообразной обмоткой и не обладающимъ сопротивленіемъ. Пусть вращеніе ротора происходитъ по часовой отрѣлкѣ, и мы будемъ ампервитки, вращающіеся въ томъ же направленіи, обозначать

какъ сопутствующее возбужденіе, а другіе—какъ идущее навстрѣчу возбужденіе. Сопутствующее возбужденіе прогоняетъ сквозь роторъ магнитный потокъ, который вращается синхронично съ роторомъ и потому не пересѣкаетъ проволокъ ротора. Этотъ магнитный потокъ представленъ для трехъ разсмотрѣнныхъ моментовъ на фиг. 344a, 344b, 344c. Само собою разумѣется, что въ дальнѣйшемъ магнитные потоки, электродвижущія силы, токи въ роторѣ и т. д. каждаго отдѣльнаго возбужденія предполагаются синусоидальными функціями положенія.

Пусть роторъ по отношенію къ идущему навстрѣчу возбужденію имѣетъ сдвигъ въ 200%. Вслѣдствіе этого въ роторѣ появляется сильный токъ короткаго замыканія, который по направленію прямо противоположенъ встрѣчному возбужденію статора, выталкиваетъ магнитный потокъ совершенно изъ ротора и заставляетъ его идти по вторичному пути утечки (фиг. 345a, 345b, 345c). Въ самомъ дѣлѣ, если сопротивленіе ротора равно нулю,



Фиг. 345a. Фиг. 345b. Фиг. 345c.

Встрѣчно направленный магнитный потокъ при холостомъ ходѣ.

то уже окажется достаточнымъ безконечно малаго числа пересѣченій силовыхъ линій, чтобы индуктировать токъ въ роторѣ, который уравновѣсилъ бы давленіе возбужденія статора. Слѣдовательно, при абсолютно холостомъ ходѣ и при роторѣ безъ сопротивленія мы имѣемъ: сопутствующее поле ротора, идущее навстрѣчу поле утечки ротора, а также идущее навстрѣчу возбужденіе ротора. Такъ какъ самый роторъ вращается синхронично, то въ отдѣльныхъ проволокахъ ротора идетъ токъ двойного числа періодовъ. Если же мы вернемся къ явленіямъ, существующимъ въ дѣйствительности, то на фиг. 344a магнитный потокъ въ роторѣ создается разностью дѣйствительныхъ ампервитковъ на статорѣ и роторѣ. На фигурѣ же 344c, имѣетъ мѣсто магнитный потокъ, который въ пространствѣ и по времени смѣщенъ на 90°. Такъ какъ токъ въ статорѣ въ этотъ моментъ равенъ нулю, то на самомъ дѣлѣ силовыя линіи, изображенныя на фиг. 344c, создадутся токомъ въ роторѣ фиг. 345c. Правило

Ампера подтверждаетъ этотъ результатъ. Поэтому идея однофазнаго двигателя приводитъ къ двухфазному двигателю, одною фазою котораго является разность токовъ въ статорѣ и роторѣ, а другою фазою—токъ въ роторѣ. При сопротивленіи въ роторѣ смѣщеніе въ пространствѣ поперечнаго поля по отношенію къ главному силовому потоку остается, между тѣмъ какъ смѣщеніе по времени уже не равно 90°.

128. Круговая діаграмма однофазнаго двигателя.

Въ дальнѣйшемъ мы будемъ предполагать, что каждое вращающееся возбужденіе состоитъ изъ нѣсколькихъ фазъ, при чемъ каждая фаза содержитъ одинъ витокъ. Такимъ образомъ, мы будемъ предполагать, что по неподвижнымъ, равномѣрно распредѣленнымъ виткамъ этимъ протекаютъ синусоидально распредѣленные токи.

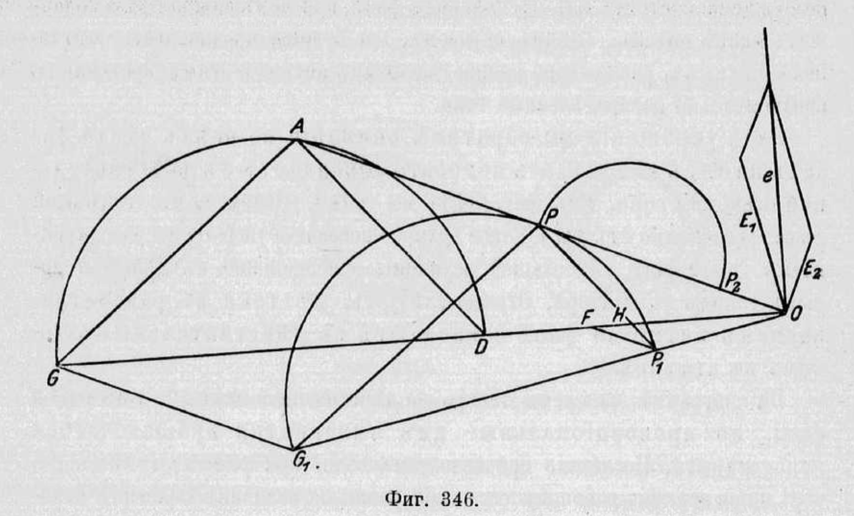
Ради упрощенія мы обратимъ вниманіе во всѣхъ этихъ фазахъ на тотъ витокъ, ось котораго совпадаетъ съ дѣйствительной осью статора. Изъ фиг. 343a мы легко убѣдимся, что токъ этой фазы, независимо отъ того, какое вращающееся возбужденіе мы разсматриваемъ, достигаетъ наибольшей величины одновременно съ дѣйствительнымъ токомъ въ статорѣ. Отсюда слѣдуетъ, что токи въ разсматриваемомъ виткѣ по фазѣ совпадаютъ съ дѣйствительнымъ токомъ въ статорѣ.

На діаграммѣ нанесемъ теперь не дѣйствующія значенія тока одной фазы, но пропорціональные имъ ампервитки вращающагося возбужденія. Послѣдніе при холостомъ ходѣ, при разомкнутомъ роторѣ и при всякомъ рабочемъ состояніи равны по величинѣ половинѣ мгновеннаго наибольшаго значенія дѣйствительныхъ ампервитковъ. Обозначимъ для краткости это значеніе при холостомъ ходѣ черезъ i_0 и при рабочемъ состояніи—черезъ i.

При разомкнутомъ роторѣ возникаютъ, благодаря обоимъ вращающимся возбужденіямъ, два равныхъ, но противоположно направленныхъ силовыхъ потока; эти потоки совмѣстно индуктируютъ въ статорѣ ту же электродвижущую силу, которую создаетъ дѣйствительное перемѣнное магнитное поле; по направленію эта сила противоположна напряженію у зажимовъ.

Во время работы, вслѣдствіе дѣйствія тока въ роторѣ, силовые потоки не равны другъ другу. Но они индуктируютъ въ статорѣ электродвижущія силы, геометрическая сумма которыхъ равна и противоположна по направленію напряженію у зажимовъ. Ко-

нечно, направленіе вращенія у силовыхъ линій различное, между тѣмъ какъ вращеніе векторовъ совершается въ одномъ и томъ же направленіи. Но нужно помнить, что векторіальная діаграмма изображаетъ только мгновенный путь, и что поэтому не имѣетъ значенія, исчезаетъ ли силовой потокъ изъ витка по направленію влѣво или вправо. Если, слѣдовательно, электродвижущая сила E_1 индуктируется **дѣйствительно въ статорѣ** силовымъ потокомъ одинаковаго направленія, а электродвижущая сила E_2 — силовымъ потокомъ противоположнаго направленія, то постоянное напряженіе у зажимовъ e будетъ равнодѣйствующей двухъ векторовъ, направленныхъ противоположно электродвижущимъ силамъ (фиг. 346).



Фиг. 346.

Электродвижущія силы въ **нашемъ разсматриваемомъ виткѣ** имѣютъ одинаковую фазу съ электродвижущими силами E_1 и E_2, такъ какъ ось этого витка совпадаетъ съ осью дѣйствительной обмотки статора. Онѣ пропорціональны намагничивающимъ ампервиткамъ OP_1 и OP_2 обоихъ вращающихся возбужденій, и ихъ векторы перпендикулярны къ векторамъ намагничивающихъ ампервитковъ. Отсюда слѣдуетъ, что равнодѣйствующая OF составляющихъ OP_1 и OP_2 перпендикулярна къ вектору напряженія у зажимовъ e и подобно ему не мѣняетъ своего значенія.

Значеніе OF мы найдемъ, если запомнимъ, что нашъ выводъ остается въ силѣ для всякаго рабочаго состоянія, слѣдовательно, и при разомкнутомъ роторѣ. Но при послѣднемъ оба намагничивающія возбужденія равны

другъ другу и, складываясь алгебраически, даютъ наибольшее значеніе **дѣйствительныхъ** ампервитковъ при холостомъ ходѣ и разомкнутомъ роторѣ. Слѣдовательно, OF будетъ равно i_0.

Какъ и раньше положимъ:

$$P_1G_1 = \frac{1}{\tau}\cdot OP_1, \qquad P_2P = \frac{1}{\tau}\cdot OP_2$$

и начертимъ оба круга Heyland'а. Такъ какъ скольженіе, если пренебречь сопротивленіемъ въ роторѣ, для идущаго навстрѣчу возбужденія равно 200%, то OP представляетъ ампервитки идущаго навстрѣчу возбужденія, величина которыхъ равна $i/2$. Такъ какъ токъ сопутствующаго возбужденія имѣетъ ту же величину и обладаетъ одинаковой фазой съ дѣйствительнымъ напряженіемъ въ статорѣ e, то точка P лежитъ на кругѣ діаграммы діаметра P_1G_1.

Полагаемъ $FG = \frac{i_0}{\tau}\cdot$ Тогда, въ силу того, что OF равнодѣйствующая составляющихъ OP_1 и OP_2, окажется, что OG равнодѣйствующая составляющихъ OP и OP_2. Отсюда слѣдуетъ, что:

$$G_1G = OP = \frac{i}{2}\cdot$$

Продолжимъ OP; тогда $OA = i$, и $PA = OP = G_1G$. Поэтому четыреугольникъ APG_1G будетъ параллелограммомъ, т. е. GA параллельно G_1P. Если, теперь, провести AD параллельно PP_1, то углы GAD и G_1PP_1 будутъ оба прямыми.

Такъ какъ P_1F равно и параллельно OP_2, то получимъ:

$$OH : HF = OP : OP_2 = \left(1 + \frac{1}{\tau}\right) : 1.$$

Соотвѣтственно этому найдемъ:

$$OH = \frac{1+\tau}{1+2\tau}\cdot OF = \frac{1+\tau}{1+2\tau}\cdot i_0.$$

Такъ какъ точка H дѣлитъ разстояніе OD пополамъ, то имѣемъ:

$$OD = 2OH = 2\cdot\frac{1+\tau}{1+2\tau}\cdot i_0.$$

Слѣдовательно, конечная точка A первичнаго вектора тока лежитъ на окружности круга, діаметръ котораго равенъ:

$$DG = OG - OD = i_0 + \frac{i_0}{\tau} - OD = \frac{i_0}{\tau} \cdot \frac{1+\tau}{1+2\tau}.$$

Отсюда вытекаютъ слѣдующія свойства однофазнаго двигателя:

1. Такъ какъ τ выражается въ десятыхъ доляхъ, то токъ при холостой работѣ OF почти вдвое больше тока при холостой работѣ при разомкнутомъ роторѣ.
2. Наибольшій коэффиціентъ мощности меньше, чѣмъ у трехфазнаго двигателя.
3. Такъ какъ у ротора, который, согласно нашему предположенію, безъ сопротивленія, скольженіе равно нулю, то число оборотовъ постоянно пропорціонально числу періодовъ. Поэтому вращающій моментъ пропорціоналенъ мощности и выразится ординатами круга DG. Слѣдовательно, способность перегружаться значительно меньше, чѣмъ у трехфазнаго двигателя.
4. Пускъ въ ходъ при нагрузкѣ не происходитъ самъ собою при включеніи сопротивленія въ цѣпь ротора, такъ какъ при состояніи покоя оба рода вращающихся ампервитковъ равнозначущи.

Пуска въ ходъ съ нагрузкой достигаютъ вспомогательной обмоткой, которая сдвинута на 90° по отношенію къ главной обмоткѣ; въ эту обмотку вводится перемѣнный токъ, фаза котораго при помощи конденсатора смѣщена по отношенію къ главному току. Двигатель трогается тогда съ мѣста, какъ двухфазный двигатель.

Далѣе находимъ [1]), что и при роторѣ съ сопротивленіемъ конечная точка первичнаго вектора тока находится на кругѣ. Центръ этого послѣдняго находится на вертикали, проходящей черезъ центръ круга, начерченнаго для ротора безъ сопротивленія.

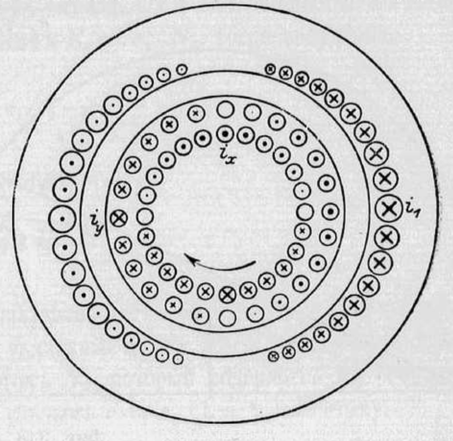
Доказать это удается болѣе просто на основаніи теоріи поперечнаго силового потока, къ чему мы и приступимъ въ слѣдующей статьѣ.

[1]) Ср. статью автора книги въ ETZ. 1905.

129. Круговая діаграмма однофазнаго двигателя, основанная на теоріи поперечнаго силового потока.

Особенно просто выясняется дѣйствіе однофазнаго двигателя, если принять во вниманіе, что въ двигателѣ возникаютъ два смѣщенныхъ по фазѣ силовыхъ потока; ихъ смѣщеніе въ пространствѣ равно 90°. Токъ въ статорѣ i_1, въ которомъ мы предполагаемъ синусоидальное распредѣленіе (фиг. 347), индуктируетъ, дѣйствуя какъ трансформаторъ, въ однослойной петлеобразной обмоткѣ ротора синусоидально распредѣленное возбужденіе ротора i_y; ось этого возбужденія неподвижна и параллельна оси витковъ статора. Вслѣдствіе встрѣчнаго дѣйствія потоковъ i_1 и i_y возникаетъ вертикальный силовой потокъ N_y.

Благодаря тому, что витки ротора при вращеніи пересѣкаютъ этотъ вертикальный потокъ, въ нихъ индуктируется динамическая электродвижущая сила. Послѣдняя вызываетъ въ роторѣ токъ i_x, который достигаетъ наибольшаго значенія по отношенію ко времени и пространству въ той катушкѣ, плоскость которой на чертежѣ 347 совпадаетъ съ вертикальной плоскостью. Синусоидально распредѣленное возбужденіе въ роторѣ i_x, ось котораго остается горизонтальной, создаетъ поперечный силовой потокъ N_x, который въ пространствѣ смѣщенъ на 90° по отношенію къ вертикальному потоку N_y.



Фиг. 347.

Несмотря на то, что уголъ FAG (фиг. 348) не прямой, для вертикальной оси получается точно такая же діаграмма на фиг. 348, какъ и для трехфазнаго двигателя. Особенно слѣдуетъ отмѣтить, что, какъ и на стр. 518:

$$OA = i_1, \qquad FA = \frac{c \cdot i_y}{1+\tau_1},$$

$$OF = i_0, \qquad FG = \frac{i_0}{\tau}.$$

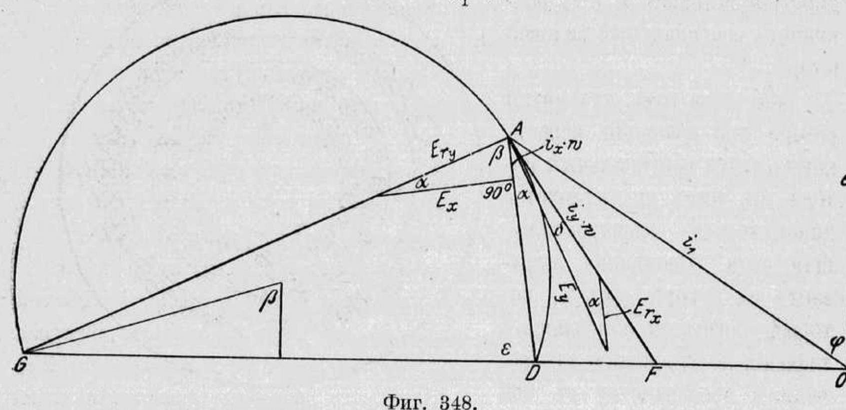
Здѣсь c множитель, который зависитъ отъ числа витковъ и отъ устройства обмотки, между тѣмъ какъ i_0 обозначаетъ токъ при холостомъ ходѣ и разомкнутомъ роторѣ.

Далѣе на діаграммѣ потоковъ на стр. 515 DL равно силовому потоку въ роторѣ $\boldsymbol{N}$, слѣдовательно, соотвѣтственно сказанному на стр. 517:

$$AG = DL \cdot \frac{FA}{FD} \cdot = \frac{\tau_1}{\tau} \cdot \boldsymbol{N}.$$

Такъ какъ діаграмма для тока на стр. 517 получена изъ діаграммы потоковъ дѣленіемъ векторовъ на $c_1 \cdot \tau_1$, то на фиг. 348, подставляя $\boldsymbol{N}_y$ вмѣсто $\boldsymbol{N}$, получимъ:

$$AG = \frac{\boldsymbol{N}_y}{c_1 \cdot \tau}.$$



Фиг. 348.

Разсмотримъ теперь тѣ токи въ роторѣ, которые проходятъ въ отдѣльные элементы времени по тѣмъ виткамъ ротора, плоскость которыхъ совпадаетъ съ горизонтальной плоскостью. Несмотря на то, что эти токи последовательно проходятъ по различнымъ виткамъ, мы можемъ разсматривать ихъ какъ одинъ перемѣнный токъ i_x, проходящій по одному и тому же витку, расположенному въ горизонтальной плоскости. Легко понять, что въ разсматриваемомъ виткѣ статическая электродвижущая сила E индуктируется только силовымъ потокомъ $\boldsymbol{N}_y$, а динамическая электродвижущая сила E_{rx} индуктируется только потокомъ $\boldsymbol{N}_x$. При этомъ E_y на 90° отстаетъ отъ $\boldsymbol{N}_y$, слѣдовательно, и отъ вектора AG, между тѣмъ какъ E_{rx} по фазѣ совпадаетъ съ потокомъ $\boldsymbol{N}_x$, который имѣетъ, напримѣръ, направленіе AD. Равнодѣйствующая двухъ составляющихъ E_y и E_{rx} даетъ омическое паденіе напряженія $i_y \cdot w$, гдѣ w сопротивленіе одного витка.

Аналогично этому омическое напряженіе $i_x \cdot w$ въ виткѣ, расположенномъ въ вертикальной плоскости, будетъ равнодѣйствующей статической электродвижущей силы E_x и динамической электродвижущей силы E_{ry}. При этомъ E_x отстаетъ на 90° отъ $\boldsymbol{N}_x$ и, слѣдовательно, отъ i_x, между тѣмъ какъ E_{ry} имѣетъ одинаковую или прямо противоположную фазу съ $\boldsymbol{N}_y$, т. е. съ AG на фиг. 348.

Изъ чертежа слѣдуетъ, что:

$$\frac{\sin\beta}{\sin\varepsilon} = \frac{DG}{AG}, \quad \frac{\sin\varepsilon}{\sin(\alpha+\delta)} = \frac{FA}{FD}, \quad \frac{\sin(\alpha+\delta)}{\sin\alpha} = \frac{E_y}{i_y \cdot w}.$$

Перемножимъ между собой лѣвыя и правыя стороны этихъ равенствъ, подставимъ $\sin\alpha = \cos\beta$, введемъ вмѣсто AG и FA найденныя значенія, и, введя коэффиціентъ c_2, положимъ $E_y = c_2 \cdot \boldsymbol{N}_y$. Тогда получаемъ:

$$tg\,\beta = c \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot \frac{\tau}{1+\tau_1} \cdot \frac{DG}{FD}.$$

Съ другой стороны, на основаніи фиг. 346:

$$tg\,\beta = \frac{E_x}{i_x \cdot w}.$$

Принимая во вниманіе вышеуказанный коэффиціентъ c_2, получаемъ $E_x = c_2 \cdot \boldsymbol{N}_x$. Далѣе, подставляя указанные на стр. 517 и 557 коэффиціенты c и c_1, мы получимъ силовой потокъ $\boldsymbol{N}_x$, который содержитъ въ себѣ горизонтальное разсѣяніе ротора, равнымъ $c \cdot c_1 \cdot i_x\,(1+\tau_2)$. Поэтому:

$$tg\,\beta = \frac{c \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot (1+\tau_2)}{w} = \boldsymbol{konst}.$$

Сравнивая оба значенія для $tg\,\beta$, получаемъ:

$$\frac{FD}{DG} = \frac{\tau}{1+\tau} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (a)$$

И такъ какъ $FG = \frac{i_0}{\tau}$, то, сдѣлавъ нѣкоторыя выкладки, найдемъ:

$$OD = 2 \cdot i_0 \cdot \frac{1+\tau}{1+2\tau}.$$

Такъ какъ по доказанному DG и уголъ β величины постоянныя, то оказывается, что конечная точка $\boldsymbol{A}$ вектора первичнаго тока лежитъ на

окружности круга, въ которомъ вписанный уголъ β опирается на хорду DG (фиг. 348). Точныя вычисленія коэффиціентовъ c, c_1 и c_2 дадутъ требуемую для построенія круга величину:

$$tg\beta = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{e}{i_0 \cdot w} \cdot \frac{1+\tau_2}{1+\tau_1} \cdot \frac{\xi_2}{\xi_1{}^2}.$$

Длина хорды DG не зависитъ отъ сопротивленія w. При $w = 0$ она становится діаметромъ DG, какъ на фиг. 346.

130. Однофазные двигатели съ коллекторомъ [1]).

Однофазный индукціонный двигатель, вслѣдствіе сравнительно незначительной способности къ перегрузкѣ, а также невыгоднаго коэффиціента мощности и отсутствія начальнаго вращающаго момента, является непригоднымъ во многихъ случаяхъ, напримѣръ, для желѣзнодорожныхъ цѣлей.

Въ этомъ отношеніи болѣе выгоднымъ является трехфазный двигатель. Но всеобщему примѣненію его для желѣзнодорожныхъ цѣлей препятствуетъ необходимость нѣсколькихъ воздушныхъ проводовъ и трудность регулировки скорости въ пути.

Поэтому появленіе въ продажѣ примѣнимыхъ на практикѣ однофазныхъ двигателей съ коллекторомъ слѣдуетъ считать значительнымъ шагомъ впередъ. Двигатели перемѣннаго тока съ коллекторомъ можно строить только какъ двигатели съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ; въ шунтовыхъ двигателяхъ, вслѣдствіе самоиндукціи, происходитъ сдвигъ фазъ между магнитнымъ силовымъ потокомъ и токомъ въ якорѣ почти на 90°, отчего получается весьма незначительный вращающій моментъ.

На практикѣ примѣняются главнымъ образомъ три типа однофазныхъ двигателей съ коллекторомъ, а именно:

1. Обыкновенный двигатель съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ; съ послѣдовательнымъ соединеніемъ обмотки якоря и электромагнитовъ.

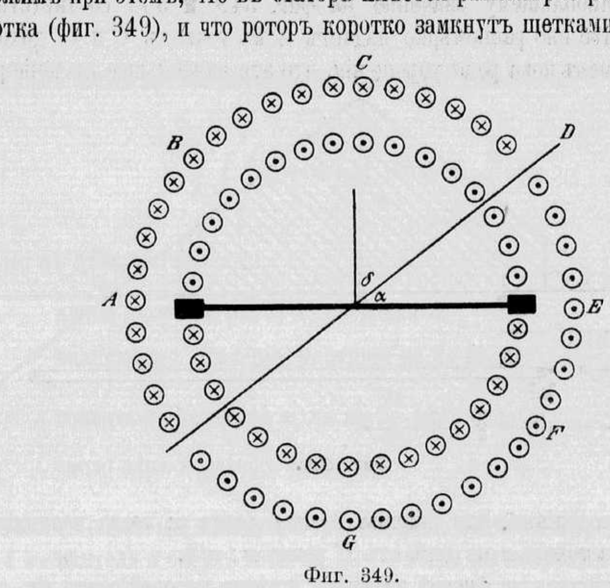
2. Репульсіонный двигатель въ которомъ силовой потокъ, вызывающій движеніе, создается одною частью обмотки статора, тогда какъ вызывающій движеніе токъ якоря, коротко замкнутаго поперечными щетками, индуктируется другою частью обмотки статора.

---

[1]) Ср. статьи Osnos ETZ, 1904, стр. 1; Eichberg, ETZ, 1904, стр. 75, и Pichelmeyer, ETZ, стр. 464.

3. Двигатель Eichberg—Latour'а, въ которомъ возбуждающій токъ подводится въ якорь, тогда какъ токъ, обусловливающій движеніе, индуктируется въ статорѣ, коротко замкнутомъ поперечными щетками.

Чтобы прослѣдить принципъ дѣйствія двигателей съ коллекторомъ, вычислимъ сначала электродвижущія силы при покоѣ и при движеніи, индуктируемыя въ якорѣ. Разсмотримъ самый общій случай, когда ось токо-витковъ якоря (т. е. направленіе силовыхъ линій, создаваемыхъ этими витками), сдвинута на уголъ α относительно оси витковъ статора. Предположимъ при этомъ, что въ статорѣ имѣется равномѣрно распредѣленная обмотка (фиг. 349), и что роторъ коротко замкнутъ щетками.



Фиг. 349.

На основаніи сказаннаго на стр. 110, коэффиціентъ M взаимной индукціи между роторомъ и статоромъ равенъ 10^{-8}-кратному числу силовыхъ линій, замкнутыхъ витками статора, если токъ въ роторѣ равенъ 1 амперу; при этомъ токъ ротора въ 1 амперъ пусть протекаетъ по соединенію для короткаго замыканія.

Такъ какъ катушка статора DF не обхватываетъ совершенно силовыхъ линій, то при разсмотрѣніи взаимной индукціи слѣдуетъ принять во вниманіе только катушку BD статора, ширина которой равна $\pi - 2\alpha = 2\delta$.

Пусть обозначаетъ:

ξ_1 число послѣдовательно соединенныхъ витковъ статора, приходящееся на одну пару полюсовъ;

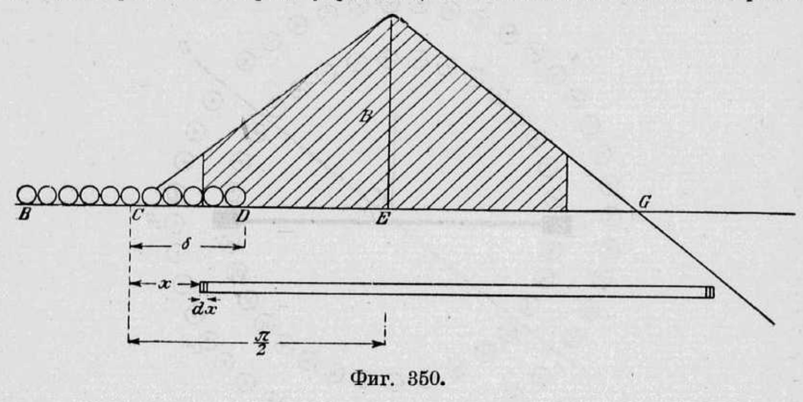
$\xi_2 = c \cdot \xi_1$ число послѣдовательно соединенныхъ витковъ ротора, приходящееся на одну пару полюсовъ.

Наибольшее значеніе индукціи, создаваемой токомъ въ 1 амперъ, какъ при послѣдовательной, такъ и при параллельной обмоткѣ, будетъ:

$$\boldsymbol{B} = \frac{0{,}4\pi \cdot \xi_2 \cdot 1}{\boldsymbol{l}},$$

гдѣ $\boldsymbol{l}$ длина двойного междужелѣзнаго пространства.

Этому наибольшему значенію на фиг. 349 и 350 соотвѣтствуетъ точка E, далѣе оно равномѣрно падаетъ и въ точкахъ C и G доходитъ до нуля. Примемъ пока ради упрощенія, что это наибольшее значеніе равно



Фиг. 350.

единицѣ, и положимъ, что ширина полюса равна π; тогда величина индукціи на разстояніи x по дугѣ отъ C равна $x : \pi/2$.

Представленная на фигурѣ катушка, ширина которой равна dx, обхватываетъ силовой потокъ, который частью положителенъ, частью отрицателенъ и опредѣляется произведеніемъ заштрихованной площади на длину якоря $\boldsymbol{b}$. Основаніе этой площади равно $\pi - 2x$, и средняя высота $\frac{1}{2}\cdot(1 + \frac{x}{\pi/2})$.

Положимъ, далѣе, ради упрощенія, что длина якоря равна единицѣ; тогда силовой потокъ, обхватываемый виткомъ шириной dx будетъ:

$$\boldsymbol{N} = \frac{1}{2}\cdot\left(1 + \frac{x}{\pi/2}\right)\cdot(\pi - 2x) = \frac{\pi}{2}\left(1 - 4\frac{x^2}{\pi^2}\right).$$

На протяженіи дуги π находится ξ_1 послѣдовательно соединенныхъ витковъ статора; слѣдовательно, на катушку, шириною dx, приходится

$\frac{dx}{\pi}\cdot\xi_1$ послѣдовательно соединенныхъ витковъ. Число потоко-витковъ, слѣдовательно, будетъ:

$$\boldsymbol{N}\cdot\frac{dx}{\pi}\cdot\xi_1 = \frac{\xi_1}{2}\left(1 - 4\frac{x^2}{\pi^2}\right)\cdot dx.$$

Суммируя на основаніи фиг. 350 въ предѣлахъ отъ $-\delta$ до $+\delta$ и полагая:

$$k = 3\frac{\delta}{\pi} - 4\frac{\delta^3}{\pi^3},$$

получимъ число потоко-витковъ на одну пару полюсовъ:

$$\frac{\xi_1}{2}\int_{-\delta}^{+\delta}\left(1 - 4\frac{x^2}{\pi^2}\right)\cdot dx = k\cdot\frac{\pi}{3}\cdot\xi_1.$$

Но въ дѣйствительности:

длина якоря не равна 1, но равна $\boldsymbol{b}$,

наибольшее значеніе индукціи не 1, но $\boldsymbol{B} = \frac{0{,}4\pi\cdot\xi_2}{\boldsymbol{l}}$,

полюсное дѣленіе не π, но въ $\frac{\boldsymbol{D}}{2p}$ разъ больше,

число паръ полюсовъ равно p.

Такимъ образомъ, найденное число потоко-витковъ надо помножить на эти 4 множителя и сверхъ того на 10^{-8}; тогда мы получимъ коэффиціентъ взаимной индукціи:

$$M = \frac{0{,}2\cdot\pi^2}{3}\cdot k\cdot\xi_1\cdot\xi_2\cdot\frac{\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{l}}\cdot 10^{-8}.$$

Отсюда весьма просто получимъ коэффиціентъ самоиндукціи L для статора безъ разсѣянія. Для это нужно только подставить вмѣсто ξ_2 значеніе ξ_1 и положить уголъ $\alpha = 0$.

При этомъ k будетъ равно 1, и мы найдемъ:

$$L = \frac{0{,}2\cdot\pi^2}{3}\cdot\xi_1^2\cdot\frac{\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{l}}\cdot 10^{-8}.$$

Положимъ теперь:

$$z = L\omega,$$

тогда вся электродвижущая сила въ статорѣ, индуктируемая токомъ i_1, включая и линіи разсѣянія, выразится:

$$E_1 = L\omega \cdot i_1 \cdot (1 + \tau_1) = (1 + \tau_1) \cdot z \cdot i_1.$$

Если въ выраженіи для L замѣнить значеніе ξ_1 черезъ $\xi_2 = c \cdot \xi_1$ и принять во вниманіе разсѣяніе, то для электродвижущей силы, индуктируемой роторомъ въ самомъ себѣ получимъ выраженіе:

$$E_2 = c^2 \cdot L\omega \cdot i_2 \cdot (1 + \tau_2) = (1 + \tau_2) \cdot c^2 \cdot z \cdot i_2.$$

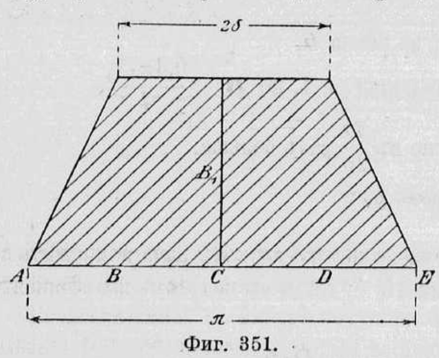
Кромѣ того, статоръ индуктируетъ въ роторѣ:

$$E_{12} = M_\omega \cdot i_1 = c \cdot k \cdot z \cdot i_1,$$

и обратно роторъ въ статорѣ:

$$E_{21} = c \cdot k \cdot z \cdot i_2.$$

Наконецъ, нужно еще опредѣлить электродвижущую силу, индуктируемую въ якорѣ вслѣдствіе в р а щ е н і я. Вслѣдствіе вращенія якоря въ своемъ собственномъ полѣ или въ полѣ силовыхъ линій катушки статора BD (фиг. 349) въ немъ не возбуждается электродвижущей силы. Она скорѣе является результатомъ того, что якорь при своемъ вращеніи пересѣкаетъ силовой потокъ N_y, создаваемый катушкой статора DF. Эти силовыя линіи N_y, обусловливающія вращеніе, проникаютъ по вертикальному направленію въ роторъ и имѣютъ въ немъ указанное на фиг. 351 распредѣленіе. Наибольшее значеніе B_1 по отношенію ко времени и пространству создается, независимо отъ способа соединенія, возбужденіемъ $\frac{\pi - 2\delta}{\pi} \cdot \xi_1 \cdot i_{1max}$, при чемъ i_1—токъ въ проводѣ сѣти. Слѣдовательно, мы получимъ:



Фиг. 351.

$$B_1 = \frac{0{,}4\pi}{l} \cdot \frac{(\pi - 2\delta)}{\pi} \cdot \xi_1 \cdot i_{1max}.$$

Чтобы изъ этого выраженія получить полный силовой потокъ, создаваемый катушкой DF на фиг. 349, мы должны заштрихованную площадь

помножить на длину якоря и на отношеніе $\frac{D \cdot \pi}{2p} : \pi$. Заштрихованная площадь равна $B_1 \cdot 2\delta + B_1 \cdot \frac{2\alpha}{2} = B_1 \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \delta\right)$. Отсюда получаемъ для наибольшаго значенія по времени:

$$N_y = \frac{0{,}2 \cdot \pi^2}{2p}\left(1 - \frac{4\delta^2}{\pi^2}\right) \cdot \frac{b \cdot D}{l} \cdot \xi_1 \cdot i_{1max}.$$

Наибольшее значеніе по времени электродвижущей силы, индуктируемой вращеніемъ, получится изъ ур. (38) на стр. 162.

$$E_{rmax} = \frac{p}{a} \cdot N_y \cdot \frac{n}{60} \cdot z_2 \cdot 10^{-8} \quad \ldots \ldots \ldots \text{(a)}$$

Но при $2a$ параллельныхъ вѣтвяхъ число z_2 витковъ ротора удовлетворяетъ уравненію

$$z_2 = 2a \cdot p \,.\, 2\xi_2.$$

Если, далѣе, v изображаетъ отношеніе дѣйствительнаго числа оборотовъ къ «синхронному» числу оборотовъ $\frac{\sim_1}{p}$, то:

$$\frac{n}{60} = v \cdot \frac{\sim_1}{p} = \frac{v \cdot \omega}{p \cdot 2\pi}.$$

Подставимъ, теперь, значенія для N_y, $\frac{n}{60}$ и z_2 въ равенство (a) и введемъ въ обѣ части равенства дѣйствующія значенія. Кромѣ того положимъ:

$$k' = \frac{3}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{4\delta^2}{\pi^2}\right).$$

Тогда, принимая во вниманіе, что $z = L\omega$, получимъ:

$$E_r = k' \cdot c \cdot v \cdot z \cdot i_1.$$

Часто полагаютъ просто:

$$k = \cos\alpha, \qquad k' = \sin\alpha.$$

Прилагаемая таблица показываетъ, что совершаемая при этомъ погрѣшность весьма незначительна.

α	$\cos\alpha$	$\sin\alpha$	k	k'
10°	0,985	0,174	0,982	0,2
20°	0,94	0,342	0,933	0,373
30°	0,866	0,5	0,853	0,53.

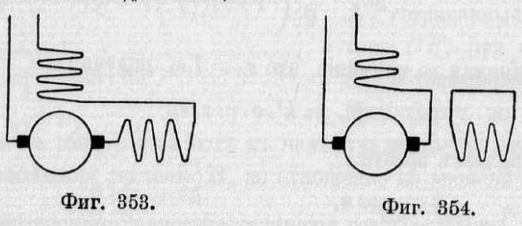
131. Двигатель перемѣннаго тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

Двигатель перемѣннаго тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ представляетъ собою двигатель съ коллекторомъ, который въ принципѣ не отличается отъ двигателя постояннаго тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ. Если мы пустимъ перемѣнный токъ въ двигатель, построенный для постояннаго тока, то направленіе тока будетъ одновременно измѣняться въ якорѣ и въ обмоткѣ электромагнитовъ, такимъ образомъ, вращающій моментъ будетъ дѣйствовать постоянно въ одномъ и томъ же направленіи.

Фиг. 352.

Однако, при работѣ съ перемѣннымъ токомъ появляется затрудненіе, состоящее въ томъ, что и якорь и обмотка электромагнитовъ создаютъ силовыя линіи, которыя, вслѣдствіе смѣщенія обѣихъ магнитныхъ осей на 90°, не нейтрализуются взаимно. Сдвигъ фазъ вслѣдствіе самоиндукціи становится, такимъ образомъ, сравнительно большимъ.

Но думать о томъ, что силовые потоки электромагнитовъ можно устранить, нельзя, такъ какъ тогда вращающій моментъ сталъ бы равнымъ нулю. Мы можемъ уничтожить создаваемый якоремъ поперечный силовой потокъ, снабдивъ для этого электромагниты компенсаціонной обмоткой (фиг. 352).



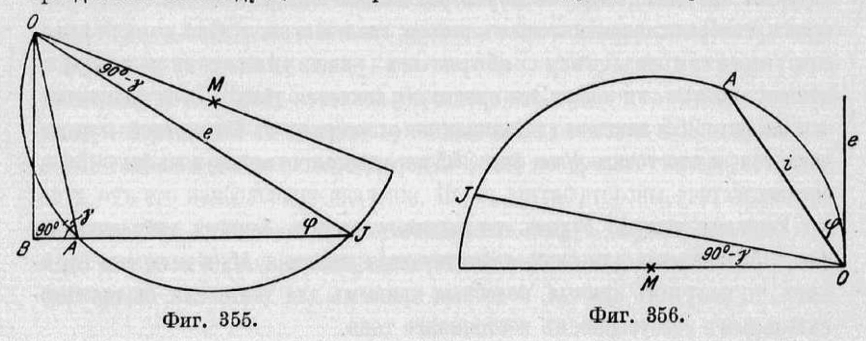
Фиг. 353. Фиг. 354.

Эта компенсаціонная обмотка на статорѣ можетъ быть послѣдовательно соединена съ обмоткой статора и ротора (фиг. 353) или же можетъ быть сама по себѣ коротко замкнута (фиг. 354), при чемъ токъ къ компенсаціонной обмоткѣ индуктируется роторомъ, дѣйствующимъ, какъ трансформаторъ. Роторъ представляетъ собою тогда первичную обмотку трансформатора съ коротко замкнутой вторичной обмоткой, въ которомъ

если пренебречь разсѣяніемъ, не индуктируется статической электродвижущей силы.

Отложимъ, теперь, на фиг. 355 векторъ тока на оси абсциссъ. Онъ отстаетъ на уголъ φ отъ вектора напряженія у зажимовъ. Если w полное сопротивленіе двигателя, то омическая потеря равна $i \cdot w$. Ея векторъ AB по фазѣ совпадаетъ съ токомъ. Точно также составляющая JA, которая идетъ на преодолѣніе противоэлектродвижущей силы, создаваемой вращеніемъ, совпадаетъ по фазѣ съ токомъ, такъ какъ электродвижущая сила вращенія достигаетъ наибольшаго значенія одновременно съ силовымъ потокомъ создаваемымъ токомъ. Поэтому JB будетъ полной ваттной составляющей напряженія.

Безваттная слагающая BO включаетъ въ себѣ величины, идущія на преодолѣніе самоиндукціи электромагнитовъ и индукціи отъ разсѣянія въ



Фиг. 355. Фиг. 356.

якорѣ; расчетъ этихъ величинъ при распредѣленной обмоткѣ данъ въ предыдущей статьѣ. Обозначимъ BO черезъ $L_r \cdot \omega \cdot i$; тогда на основаніи статьи 74:

$$tg\,\gamma = \frac{L_r \cdot \omega}{w}.$$

Уголъ γ, такимъ образомъ, величина постоянная, и, слѣдовательно, точка A лежитъ на окружности круга, въ которомъ уголъ $180° - \gamma$ вписанный и опирается на хорду $e = JO$. Центръ M этого круга лежитъ на прямой, которая проходитъ черезъ точку O и составляетъ съ JO уголъ $90° - \gamma$ (фиг. 355).

Но $AO = i \cdot \sqrt{w^2 + (L_r \cdot \omega)^2}$. Обозначимъ, теперь, черезъ J_0 токъ короткаго замыканія и раздѣлимъ всѣ векторы на $\sqrt{w^2 + (L_r \cdot \omega)^2}$. Тогда получимъ:

$$OJ = \frac{e}{\sqrt{w^2 + (L_r \cdot \omega)^2}} = J_0, \qquad OA = i_1,$$

а діаметръ круга будетъ равенъ $J_0/cos\,(90-\gamma) = J_0/sin\gamma$. Въ то же время повернемъ діаграмму такъ, чтобы OM совпало съ осью абсциссъ. Такъ какъ на фиг. 355 уголъ AOM равенъ $90^\circ - \varphi$, то на фиг. 356 векторъ $OA = i$ образуетъ съ осью ординатъ уголъ φ.

Поэтому на фиг. 356 векторъ напряженія у зажимовъ совпадаетъ съ осью ординатъ.

Вращающій моментъ пропорціоналенъ силовому потоку и силѣ тока, т. е. при незначительномъ насыщеніи желѣза пропорціоналенъ квадрату силы тока.

Число оборотовъ мы найдемъ, не принимая во вниманіе постояннаго коэффиціента, если на фиг. 355 раздѣлимъ электродвижущую силу $E_r = AJ$ на силовой потокъ. Такъ какъ послѣдній пропорціоналенъ вектору OA, то число оборотовъ пропорціонально отношенію $AJ : OA$, или, если пренебречь сопротивленіемъ ротора, значенію $cos\varphi$. Слѣдовательно, съ увеличеніемъ числа оборотовъ увеличивается и коэффиціентъ мощности $cos\varphi$. Это просто объясняется тѣмъ обстоятельствомъ, что на фиг. 355 ваттная слагающая по отношенію къ безваттной—увеличивается, и что точка A на фиг. 355 перемѣщается влѣво, а на фиг. 356—вправо.

Если мы, теперь, будемъ откладывать по оси абсциссъ найденныя на фиг. 356 значенія для i и соотвѣтствующія значенія M_d и n по оси ординатъ, то получимъ кривыя, подобныя кривымъ для двигателя съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ постояннаго тока.

Для двигателей съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ съ коллекторомъ весьма важнымъ является вопросъ о коммутированіи. Какъ и у двигателей постояннаго тока, въ коротко замкнутой катушкѣ появляется электродвижущая сила самоиндукціи, пропорціональная силѣ тока и числу оборотовъ. Такъ какъ подлежащій коммутаціи токъ—перемѣнный, то самоиндукція измѣняется вмѣстѣ съ мгновеннымъ значеніемъ силы тока, при чемъ фазы самоиндукціи и тока совпадаютъ. Эта самоиндукція поддается компенсаціи путемъ установки добавочныхъ полюсовъ, подобно тому, какъ у двигателей постояннаго тока.

Въ то же время въ коротко замкнутой катушкѣ появляется статическая электродвижущая сила; она индуктируется благодаря тому, что эта катушка пересѣкается магнитнымъ силовымъ потокомъ и по отношенію къ обмоткѣ статора образуетъ вторичную обмотку трансформатора. Эта индуктируемая электродвижущая сила отстаетъ на 90° отъ силового потока и пропорціональна этому потоку и числу періодовъ. При троганіи съ мѣста сила эта достигаетъ наибольшей величины, такъ какъ въ этотъ моментъ токъ, а слѣдовательно и магнитный потокъ, достигаютъ наибольшей величины.

Для того, чтобы статическая электродвижущая сила въ коротко замкнутой катушкѣ не возбуждала слишкомъ сильныхъ токовъ, выбираютъ въ соотвѣтствіи съ этимъ незначительный силовой потокъ и незначительное число періодовъ. Двигатели съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ работаютъ при 15 или 25 періодахъ выгоднѣе, чѣмъ при 50. Можно еще рекомендовать примѣненіе узкихъ и твердыхъ щетокъ и установку сопротивленій между якоремъ и коллекторомъ. Заводъ Сименсъ—Шуккертъ устраиваетъ изъ этихъ сопротивленій особенную мѣдную обмотку, которая располагается въ каналахъ якоря такимъ образомъ, чтобы проходящіе по нимъ токи усиливали вращающій моментъ.

По сравненію съ двигателемъ постояннаго тока, двигатель перемѣннаго тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ обнаруживаетъ бо́льшую потерю на гистерезисъ, такъ какъ не только роторъ, но и статоръ перемагничиваются. Нужно еще не упускать изъ виду того, что при расчетѣ средняго вращающаго момента принимается во вниманіе только дѣйствующая величина силового потока, тогда какъ потеря на гистерезисъ зависитъ отъ его наибольшаго значенія. Но, съ другой стороны, двигатели перемѣннаго тока имѣютъ то преимущество, что могутъ быть пущены въ ходъ и регулируемы безъ пускового реостата—посредствомъ одного только трансформатора.

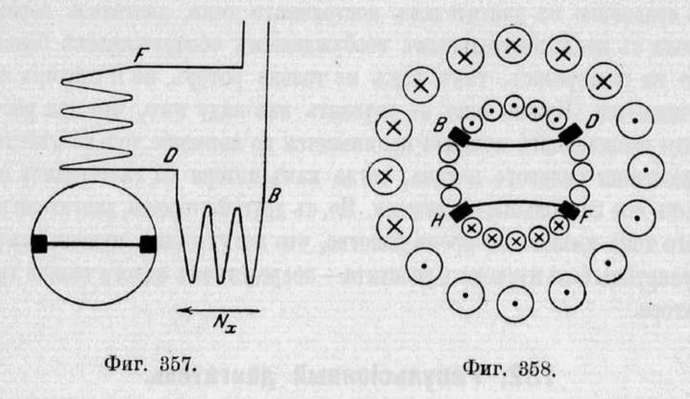
132. Репульсіонный двигатель.

Отличительнымъ свойствомъ репульсіоннаго двигателя является тотъ фактъ, что токъ, обусловливающій вращеніе, не доставляется якорю посредствомъ щетокъ, а индуктируется статической индукціей одной части обмотки статора и одновременно этой же обмоткой и компенсируется. Разсматривая съ внѣшней стороны, репульсіонный двигатель мы получаемъ изъ того, что въ трансформаторѣ на фиг. 354, состоящемъ изъ ротора и компенсаціонной обмотки, мы мѣняемъ мѣстами первичную и вторичную части (фиг. 357). Въ обмоткѣ статора мы различаемъ индуктирующую обмотку BD и обмотку возбужденія DF. Въ дѣйствительности обѣ обмотки составляютъ, какъ это видно изъ фиг. 349, одну обмотку, распредѣленную по окружности, при чемъ ея ось смѣщена по отношенію къ оси витковъ ротора. На фиг. 349, тѣ же витки BD являются витками индуктирующими, а витки DF—обмоткой возбужденія. При соотношеніяхъ, взятыхъ на фиг. 349, вращающій моментъ направленъ по часовой стрѣлкѣ. Число оборотовъ можно

регулировать, передвигая щетки. Передвигая щетки въ обратномъ направленіи, можно перемѣнить направленіе вращенія двигателя.

Если желательно, чтобы индуктируемая обмотка ротора была расположена по отношенію къ индуктирующей части обмотки статора, какъ изображеніе въ зеркалѣ по отношенію къ предмету, и чтобы она занимала только опредѣленную часть обмотки, то можно выбрать, соотвѣтственно фиг. 91, меньшій шагъ обмотки. Но этого также можно достигнуть устройствомъ двухъ паръ щетокъ (**репульсіонный двигатель Броунъ—Бовери**). При этомъ въ дѣйствіи находятся только части ротора BD и FH, между тѣмъ какъ части DF и BH выключены.

Такимъ устройствомъ достигается лучшая компенсація, при чемъ, передвигая щетки при B и F, можно измѣнять уголъ α между осями ротора



Фиг. 357. Фиг. 358.

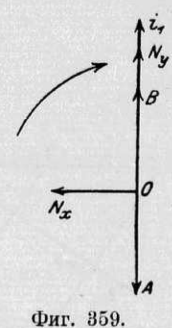
и статора въ очень узкихъ предѣлахъ. Такъ какъ перемѣщенію щетокъ на уголъ $\Delta\alpha$ въ данномъ случаѣ соотвѣтствуетъ перемѣщеніе магнитной оси только на уголъ $\frac{\Delta\alpha}{2}$, то названные двигатели сравнительно мало чувствительны къ перемѣщенію щетокъ.

Теперь мы приступимъ къ опредѣленію величины и фазы возбуждающаго силового потока $\boldsymbol{N}_y$, создаваемаго возбуждающей обмоткой DF (фиг. 357) и трансформаторнаго потока $\boldsymbol{N}_x$, создаваемаго совмѣстнымъ дѣйствіемъ индуктирущей обмотки BD и ротора.

Возбуждающій силовой потокъ $\boldsymbol{N}_y$ индуктируетъ въ роторѣ при вращеніи электродвижущую силу OB (фиг. 359). Послѣдняя достигаетъ наибольшаго значенія одновременно съ токомъ въ статорѣ i_1, который создаетъ потокъ $\boldsymbol{N}_y$. Совмѣстимъ векторъ тока i_1 и возбуждающаго силового потока $\boldsymbol{N}_y$ съ положительной осью ординатъ; тогда векторъ электродвижущей силы

OB тоже совпадетъ съ осью ординатъ. Кромѣ того онъ совпадетъ съ **положительнымъ** направленіемъ оси; это ясно изъ того, что, какъ и при постоянномъ токѣ, направленіе его прямо противоположно направленію тока въ **роторѣ**, индуктируемаго путемъ трансформированія, т. е. онъ совпадаетъ съ направленіемъ тока въ **статорѣ**.

Горизонтальный силовой потокъ трансформатора $\boldsymbol{N}_x$ (фиг. 357), который возникаетъ вслѣдствіе противодѣйствія индуктирующей части статора BD и индуктируемаго тока въ роторѣ, индуктируетъ въ обмоткѣ ротора статическую электродвижущую силу. Если пренебречь омической потерей въ роторѣ, то эта сила уравновѣшиваетъ динамическую электродвижущую силу. Слѣдовательно, ея векторъ OA совпадаетъ съ отрицательной осью ординатъ. Такъ какъ электродвижущая сила отстаетъ на 90° отъ силового потока $\boldsymbol{N}_x$, то векторъ послѣдняго пойдетъ влѣво по оси абсциссъ. Смѣщенные въ пространствѣ на 90° силовые потоки оказываются, такимъ образомъ, смѣщенными и **по времени** на 90°, т. е. репульсіонный двигатель обладаетъ вращающимся полемъ.



Фиг. 359.

Равнымъ образомъ на основаніи равенства обѣихъ электродвижущихъ силъ, если обозначимъ черезъ v отношеніе числа оборотовъ при любомъ рабочемъ состояніи къ синхронному числу оборотовъ $\frac{\sim_1}{p}$, и если примемъ, что коэффиценты для электродвижущихъ силъ статической и динамической приблизительно равны другъ другу,—получимъ:

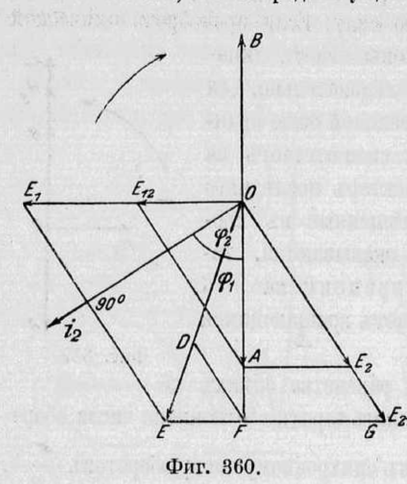
$$\boldsymbol{N}_x = v \cdot \boldsymbol{N}_y.$$

Отсюда слѣдуетъ, что при синхронной работѣ ($v = 1$) оба потока равны, т. е. вращающееся поле является совершеннымъ. При покоѣ ($v = 0$) поперечный силовой потокъ равенъ нулю, такъ какъ при этомъ, какъ и при пускѣ въ ходъ коротко-замкнутаго трехфазнаго двигателя, всѣ горизонтальныя силовыя линіи противодѣйствіемъ тока въ роторѣ вытѣсняются изъ послѣдняго. При очень большомъ числѣ оборотовъ, какъ показываетъ приведенное равенство, горизонтальный силовой потокъ отъ трансформированія значительно превышаетъ возбуждающій силовой потокъ.

Приступимъ теперь къ построенію діаграммы векторовъ для репульсіоннаго двигателя (фиг. 360). Векторъ тока въ статорѣ i_1 совмѣстимъ съ осью ординатъ. Тогда векторъ $OB = E_r$, изображающему электродвижущую силу при вращеніи въ потокѣ $\boldsymbol{N}_y$, тоже совпадетъ съ осью ординатъ.

Равный по величинѣ, но противоположный по направленію векторъ OA изображаетъ статическую электродвижущую силу, которая индуктируется поперечнымъ силовымъ потокомъ N_x въ роторѣ.

Итакъ, векторъ индуктируемаго въ роторѣ тока прямо противоположенъ по направленію вектору тока въ статорѣ, т. е. онъ направленъ вертикально внизъ. Тогда статическая электродвижущая сила OA является равнодѣйствующей изъ электродвижущей силы E_2, индуктируемой роторомъ въ самомъ себѣ, и электродвижущей силы E_{12}, индуктируемой въ роторѣ индуктирующей частью обмотки статора. При этомъ E_2 отстаетъ на 90° отъ i_2, какъ и E_{12} на тѣ же 90° отъ i_1.



Фиг. 360.

Съ другой стороны индуктируемая во всемъ статорѣ электродвижущая сила OE является суммой электродвижущей силы E_1, индуктируемой статоромъ въ самомъ себѣ, и электродвижущей силы E_{21}, индуктируемой роторомъ въ статорѣ. При этомъ опять-таки E_1 отстаетъ на 90° отъ i_1, какъ и E_{21} на тѣ же 90° отъ i_2. Напряженіе у зажимовъ e направлено противоположно вектору OE. Съ векторомъ тока оно образуетъ уголъ $\varphi_1 = EOF$.

На основаніи статьи 130 получимъ:

$$E_1 = z(1+\tau_1)\cdot i_1,$$
$$E_{12} = k\cdot c\cdot z\cdot i_1,$$
$$E_2 = c^2\cdot z\cdot(1+\tau_2)\cdot i_2,$$
$$E_{21} = k\cdot c\cdot z\cdot i_2,$$
$$E_r = k'\cdot c\cdot v\cdot z\cdot i_1.$$

Примемъ во вниманіе равенство:

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_1\cdot\tau_2 = \tau.$$

Тогда, на основаніи фигуры и этихъ равенствъ, найдемъ (фиг. 360):

$$FE = E_1 - GF = E_1 - E_{12}\cdot\frac{E_{21}}{E_2} = \frac{1+\tau-k^2}{1+\tau_2}\cdot z\cdot i_1,$$

$$OF = OA\cdot\frac{E_{21}}{E_2} = E\cdot\frac{E_{21}}{E_2} = \frac{k\cdot k'\cdot v}{1+\tau_2}\cdot z\cdot i_1.$$

Отсюда:

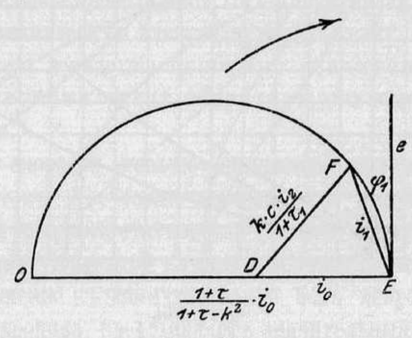
$$tg\,\varphi_1 = \frac{FE}{OF} = \frac{1+\tau-k^2}{k\cdot k'\cdot v}.$$

Если еще провести FD параллельно E_{21}, то имѣемъ:

$$DF = E_{21}\cdot\frac{FE}{E_1} = \frac{1+\tau-k^2}{1+\tau}\cdot k\cdot c\cdot z\cdot i_2,$$

$$DE = \frac{FE}{E_1}\cdot OE = \frac{1+\tau-k^2}{1+\tau}\cdot e.$$

Раздѣлимъ, теперь, векторы на постоянную величину: $\frac{1+\tau-k^2}{1+\tau_2}\cdot z$ и будемъ вращать чертежъ, пока EO не совпадетъ съ осью абсциссъ. Въ



Фиг. 361.

то же время выразимъ напряженіе у зажимовъ e черезъ токъ при холостомъ ходѣ и при разомкнутомъ роторѣ на основаніи равенства:

$$e = i_0\cdot z\cdot(1+\tau_1).$$

Такимъ путемъ получимъ діаграмму на фиг. 361. Въ послѣдней:

$$EF = i_1, \qquad FD = \frac{k.c}{1+\tau_1}\cdot i_2,$$

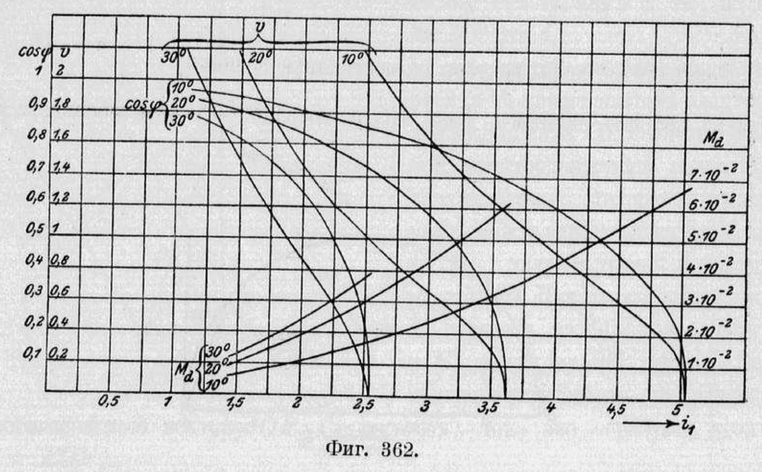
$$ED = i_0. \qquad EO = \frac{1+\tau}{1+\tau-k^2}\cdot i_0.$$

Такъ какъ уголъ EFO прямой, то конечная точка вектора первичнаго тока лежитъ на окружности круга, постоянный діаметръ котораго равенъ

току короткаго замыканія EO. При этомъ легко показать, что векторъ напряженія у зажимовъ совпадаетъ съ осью ординатъ. Этотъ результатъ обнаруживаетъ замѣчательное соотвѣтствіе съ діаграммой Heyland'а.

Діаграмма даетъ возможность для каждаго значенія угла фазы φ_1 найти соотвѣтствующій токъ въ статорѣ и въ роторѣ. Кромѣ того, легко найдется скорость v, которая, на основаніи приведеннаго, равенства обратно пропорціональна $tg\varphi$. Наконецъ, для вращающаго момента получимъ равенство:

$$M_d = \frac{e \cdot i_1 \cdot \cos\varphi_1}{9{,}81 \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60}}.$$



Фиг. 362.

Въ этомъ равенствѣ всѣ величины уже извѣстны. Но мы можемъ ихъ еще преобразовать, положивъ $\frac{n}{60} = v \cdot \frac{\backsim_1}{p}$, $e = i_0 \cdot z \cdot (1 + \tau_1)$ и, на основаніи фиг. 360, $\cos\varphi_1 = \frac{OF}{e}$. Тогда получимъ:

$$M_d = \frac{p \cdot k \cdot k'}{9{,}81 \cdot 2\pi \cdot \backsim_1} \cdot \frac{e}{i_0 \cdot (1 + \tau)} \cdot i_1^2.$$

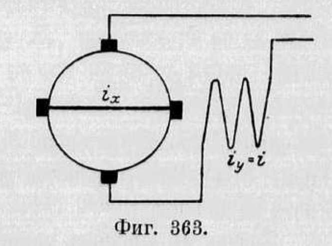
На фиг. 362 отложены силы тока по оси абсциссъ, а коэффиціентъ мощности, скорость и вращающій моментъ по оси ординатъ для угла сдвига щетокъ $\alpha = 10°$, $20°$ и $30°$. Для упрощенія принято i_0 и $\frac{p \cdot e}{\backsim_1} = 1$, а $\tau = 0{,}2$. Ясно, что и репульсіонный двигатель работаетъ подобно двигателю постояннаго тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

Посмотримъ теперь, какіе процессы имѣютъ мѣсто при коммутированіи. Во-первыхъ, подобно тому, какъ въ двигателяхъ постояннаго тока, появляется электродвижущая сила самоиндукціи въ коротко замкнутой катушкѣ; эта сила возрастаетъ вмѣстѣ съ увеличеніемъ числа оборотовъ и силы тока въ роторѣ. Но когда двигатель работаетъ только въ правой части діаграммы фиг. 361, токъ въ роторѣ имѣетъ почти постоянную величину; число же оборотовъ, на основаніи выраженія для $tg\varphi_1$, послѣдовательно увеличивается и тѣмъ больше, чѣмъ далѣе вправо перемѣщается по окружности точка F. Вслѣдствіе этого самоиндукція коротко замкнутой катушки сильно увеличивается. При большомъ числѣ оборотовъ появляется еще одно неудобство. Въ то время, какъ при синхронномъ числѣ оборотовъ имѣетъ мѣсто совершенное вращающееся поле, которое не оказываетъ никакого индуктирующаго дѣйствія на коротко замкнутую катушку, при высокомъ числѣ оборотовъ, какъ мы видѣли на стр. 571, поперечный силовой потокъ N_x получаетъ значительное преобладаніе. Онъ индуктируетъ въ этой катушкѣ (см. фиг. 357) динамическую электродвижущую силу. Въ виду того, что эта сила появляется вслѣдствіе особенно значительнаго силового потока и при высокомъ числѣ оборотовъ, она невыгодно дѣйствуетъ на коммутированіе.

Обратно, при скорости меньше синхронной получаетъ преобладаніе возбуждающій потокъ N_y. Можно доказать, что индуктируемая имъ въ коротко замкнутой катушкѣ статическая электродвижущая сила отчасти уничтожаетъ самоиндукцію этой катушки. Слѣдовательно, репульсіонный двигатель по отношенію къ коммутированію безъ искренія при скорости низшей, чѣмъ синхронная, представляетъ значительныя преимущества.

133. Двигатель Eichberg—Latour'a.

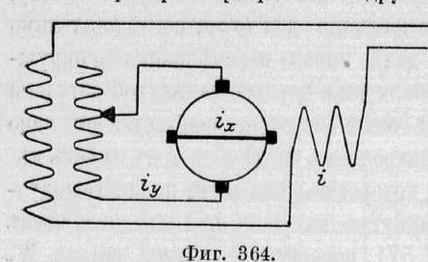
Представленный въ схематичномъ видѣ на фиг. 363 двигатель Eichberg—Latour'a отличается отъ репульсіоннаго двигателя тѣмъ, что онъ возбуждается роторомъ при помощи тока $i_y = i$, который создаетъ вертикальный силовой потокъ N_y, между тѣмъ какъ обусловливающій движеніе токъ въ роторѣ i_x, витки котораго имѣютъ горизонтальную ось, индуктируется путемъ трансформированія въ коротко замкнутомъ посредствомъ щетокъ роторѣ. Витки ротора съ горизонтальной осью образуютъ при этомъ вторичную обмотку трансформатора,



Фиг. 363.

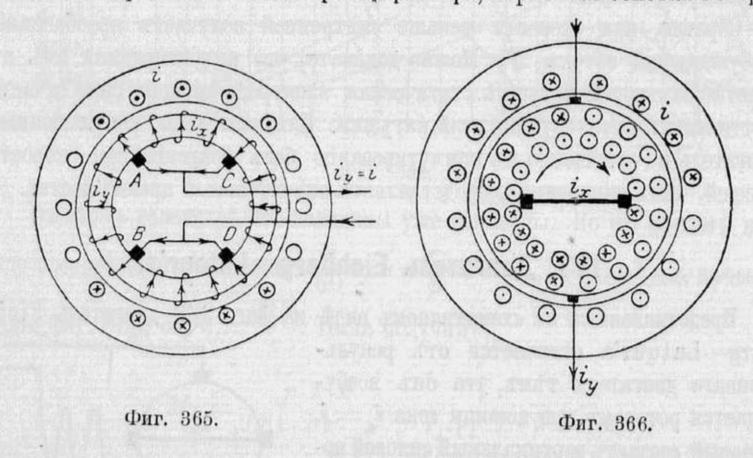
первичную обмотку котораго составляютъ витки статора, по которымъ идетъ токъ i. Проще всего представить себѣ на роторѣ двѣ разъединенныя обмотки съ двумя коллекторами, при чемъ на каждый приходится пара щетокъ.

Въ двигателѣ Eichberg'а возбуждающая обмотка и индуктируемая обмотка ротора перекрываютъ другъ друга, какъ на фиг. 363, и образуютъ одну обмотку. При устройствѣ, представленномъ на фиг. 365 и предложенномъ Latour'омъ, обѣ обмотки въ пространствѣ отдѣлены другъ отъ друга. По части AB и CD ротора проходитъ токъ $i_y = i$, между тѣмъ какъ въ коротко замкнутыхъ частяхъ AC и BD, ось которыхъ совпадаетъ съ осью статора, токъ индуктируется дѣйствіемъ статора.



Фиг. 364.

Въ дѣйствительности роторъ двигателя Eichberg'а не возбуждается непосредственно первичнымъ токомъ i, но возбуждающій токъ i_y доставляется вторичной обмоткой трансформатора, первичная обмотка котораго



Фиг. 365. Фиг. 366.

соединена послѣдовательно съ витками статора, и по ней проходитъ токъ i (фиг. 364). Изъ устройства на фиг. 363 въ этомъ случаѣ существенно ничего не мѣняется.

Теперь мы укажемъ принципъ дѣйствія двигателя Eichberg'а, принимая во вниманіе перемѣнный коэффиціентъ трансформаціи послѣдовательно включеннаго трансформатора. Пусть будетъ:

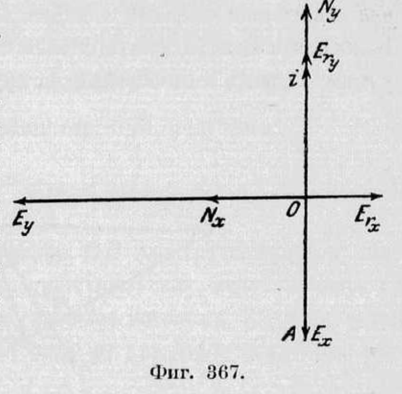
u отношеніе первичныхъ и вторичныхъ витковъ трансформатора,
i первичный токъ въ трансформаторѣ,
i_y вторичный » » » .

Тогда

$$i_y = u \cdot i.$$

Такъ какъ при включеніи трансформатора существенныхъ измѣненій сравнительно съ фиг. 363 не произошло, то мы въ правѣ приписать току i_y въ двигателѣ ту же фазу, что и току i (фиг. 367). На практикѣ можно считать, что оба тока въ трансформаторѣ смѣщены ровно на 180° относительно другъ друга.

Возбуждающій токъ i_y, витки котораго имѣютъ вертикальную ось и изображены на фиг. 366 на наружной поверхности ротора, создаетъ въ роторѣ вертикальный возбуждающій силовой потокъ N_y. Этимъ потокомъ индуктируется въ обмоткѣ X того же самаго ротора динамическая электродвижущая сила E_{ry}, которая по фазѣ совпадаетъ съ потокомъ N_y. Слѣдовательно, ея векторъ на фиг. 367 совпадаетъ по направленію съ векторами i и N_y.

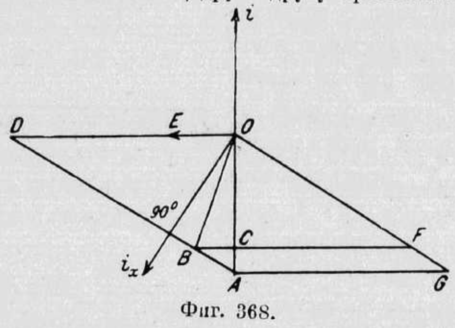


Фиг. 367.

Такъ какъ, сумма электродвижущихъ силъ въ обмоткѣ X ротора, если пренебречь сопротивленіемъ ротора, равна нулю, то статическая электродвижущая сила E_x, индуктируемая путемъ трансформированія въ обмоткѣ X, изобразится векторомъ, равнымъ и прямо противоположнымъ вектору E_{ry}; слѣдовательно, на фиг. 367 этотъ векторъ совпадаетъ съ отрицательной осью ординатъ. Горизонтальный силовой потокъ трансформатора N_x, создающій статическую электродвижущую силу E_x, опережаетъ ее на 90° и, слѣдовательно, на фиг. 367 расположится по оси абсциссъ влѣво. Отсюда слѣдуетъ, что и двигатель Eichberg—Latour'а обладаетъ вращающимся полемъ. Подобно тому, какъ и у репульсіоннаго двигателя, при приблизительно синхронной работѣ оба смѣщенные во времени и пространствѣ на 90° силовые потока будутъ другъ другу равны, и, слѣдовательно двигатель обладаетъ совершеннымъ полемъ.

Въ обмоткѣ Y ротора также появляются двѣ электродвижущія силы, при чемъ статическая электродвижущая сила E_y индуктируется возбу-

ждающимъ силовымъ потокомъ N_y, а динамическая электродвижущая сила E_{rx}—потокомъ N_x. Такъ какъ электродвижущая сила E_y на $90°$ отстаетъ отъ тока i_y, то ея векторъ на фиг. 367 направляется по оси абсциссъ влѣво отъ начала координатъ. Фазу электродвижущей силы E_{rx} можно найти, если вспомнимъ, что ея наибольшее значенiе соотвѣтствуетъ наибольшему значенiю потока N_x. Слѣдовательно, ея векторъ совпадаетъ съ осью абсциссъ, но пока еще нельзя сказать, пойдетъ ли онъ вправо или влѣво. Принимая во вниманiе, что оба перемѣнныхъ потока N_x и N_y создаютъ вращающiйся силовой потокъ, который если бы являлся совершеннымъ, то при синхронной скорости совсѣмъ не пересѣкалъ бы витковъ ротора, находимъ, что электродвижущiя силы статическая и динамическая въ обмоткѣ ротора Y, какъ и въ обмоткѣ X, другъ другу противоположны по направленiю. Слѣдовательно, векторъ E_{rx} на фиг. 367 пойдетъ вправо по оси абсциссъ.



Фиг. 368.

Нужно замѣтить, что разность $E_y - E_{rx}$, выражающая полную противоэлектродвижущую силу въ возбуждающей обмоткѣ, совершенно безваттна. Поэтому напряженiе у послѣдовательно включеннаго трансформатора, равное $u\,(E_y - E_{rx})$, тоже безваттно.

Въ дальнѣйшемъ мы постараемся опредѣлить силу тока, скорость и вращающiй моментъ въ зависимости отъ угла смѣщенiя фазъ. При этомъ оказывается удобнымъ ввести въ дiаграмму обратную величину силы тока i.

Токъ въ статорѣ i (фиг. 368) индуктируетъ въ роторѣ электродвижущую силу

$$OD = c \cdot z \cdot i \quad \ldots \ldots \ldots \quad (a)$$

и въ самомъ себѣ, благодаря потоку разсѣянiя, электродвижущую силу

$$OE = \tau_1 \cdot z \cdot i \quad \ldots \ldots \ldots \quad (b)$$

Обѣ эти электродвижущiя силы отстаютъ на $90°$ отъ тока въ статорѣ i.

Токъ въ роторѣ i_x, прямо противоположный току въ статорѣ, индуктируетъ въ самомъ себѣ, благодаря силовымъ линiямъ, одновременно перенесеннымъ на статоръ, электродвижущую силу OF и благодаря своему потоку разсѣянiя—электродвижущую силу FG. При этомъ

$$FG = \tau_2 \cdot OF.$$

Обѣ эти электродвижущiя силы OF и FG отстаютъ на $90°$ отъ тока i_x.

Равнодѣйствующая OA составляющихъ OD и OG представляетъ полную статическую электродвижущую силу E_x въ горизонтально расположенной обмоткѣ ротора. Она равна и противоположна по направленiю динамичечкой электродвижущей силѣ E_{ry}; ея векторъ, поэтому, совпадаетъ съ осью ординатъ. Если, теперь, положить $k' = \frac{3}{\pi}$ и для i_1 ввести значенiе $c \cdot (1 + \tau_2) \cdot u \cdot i$, то, на основанiи стр. 565, получимъ:

$$OA = E_x = E_{ry} = \frac{3}{\pi} \cdot c^2 \cdot v \cdot z \cdot u \cdot i \cdot (1 + \tau_2) \quad \ldots \ldots \quad (c)$$

Съ другой стороны, равнодѣйствующая OB электродвижущихъ силъ OF и OD представляетъ собой электродвижущую силу, индуктируемую въ роторѣ общимъ для ротора и статора силовымъ потокомъ. Индуктируемая этимъ же потокомъ электродвижущая сила въ статорѣ, вслѣдствiе различнаго числа витковъ, будетъ $\frac{OB}{c}$. Она имѣетъ ваттную составляющую $\frac{OC}{c}$ и безваттную составляющую $\frac{CB}{c}$.

Такъ какъ кромѣ составляющей $\frac{OC}{c}$, индуктируемой со стороны ротора, въ двигателѣ другiя ваттныя составляющiя не возникаютъ, то ваттная составляющая напряженiя въ цѣпи будетъ:

$$e \cdot \cos\varphi = \frac{OC}{c} = \frac{OA}{c} \cdot \frac{OF}{OG} = \frac{OA}{c} \cdot \frac{1}{1 + \tau_2} \quad \ldots \ldots \quad (d)$$

На основанiи фиг. 368, безваттная составляющая индуктируемой со стороны ротора въ статорѣ электродвижущей силы будетъ:

$$\frac{CB}{c} = \frac{OD}{c} \cdot \frac{FG}{OG} = \frac{OD}{c} \cdot \frac{\tau_2}{1 + \tau_2}.$$

Сумма $OE + \frac{CB}{c}$ представляетъ тогда полное безваттное напряженiе въ статорѣ. На основанiи фиг. 367, къ этому надо еще прибавить безваттное

напряженіе $u\cdot(E_y - E_{rx})$ включеннаго послѣдовательно трансформатора. Поэтому полная безваттная составляющая напряженія въ цѣпи выразится:

$$e\cdot sin\varphi = OE + \frac{OD}{c}\cdot\frac{\tau_2}{1+\tau_2} + u\cdot(E_y - E_{rx})\; . \; . \; . \; . \quad (e)$$

При этомъ, если положимъ $k = 1$, то получимъ, на основаніи стр. 564:

$$E_y = c^2\cdot z\cdot u\cdot i\cdot(1+\tau_2).\; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (f)$$

Электродвижущую силу E_{rx} мы найдемъ, исходя изъ того, что индуктируемыя однимъ и тѣмъ же силовымъ потокомъ электродвижущія силы статическая и динамическая относятся между собой, какъ $k'\cdot v : k$, т. е. въ нашемъ случаѣ какъ $3/\pi\cdot v : 1$. Поэтому найдемъ, что

$$E_{rx} = \frac{3}{\pi}\cdot v\cdot E_x = \frac{3}{\pi}\cdot v\cdot OA\; .$$

Введемъ, теперь, найденныя выраженія для электродвижущихъ силъ въ равенства (d) и (e) и положимъ:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1\cdot\tau_2,$$

$$k_0 = \frac{3}{\pi}\cdot u\cdot\frac{c\cdot z}{e}$$

$$k_1 = \frac{\tau\cdot z}{(1+\tau_2)\cdot e} + \frac{u^2\cdot c^2\cdot z\;(1+\tau_2)}{e}$$

$$k_2 = \frac{e}{e\cdot(1+\tau_2)}\; .$$

Тогда изъ равенства (d) получимъ:

$$v = \frac{cos\varphi}{k_0\cdot i}\; ,$$

и, подставляя это значеніе въ равенство (e):

$$\frac{1}{i}\cdot sin\varphi = k_1 - \frac{1}{k_2}\cdot\frac{1}{i^2}\cdot cos^2\varphi.$$

Направимъ, теперь, на фиг. 369 векторъ напряженія у зажимовъ по оси ординатъ. Пусть векторъ тока i отстаетъ на уголъ φ отъ напряженія у зажимовъ. Въ фазѣ тока i откладываемъ обратную его величину $1/i$.

Тогда $x = \frac{1}{i}\cdot sin\varphi$ и $y = \frac{1}{i}\,cos\varphi$. Поэтому, на основаніи послѣдняго равенства:

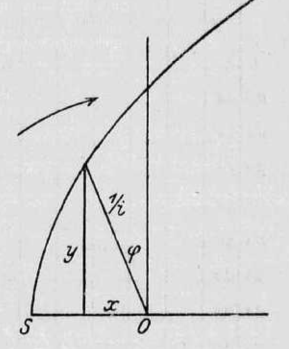
$$x = k_1 - \frac{1}{k_2}\cdot y^2\; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (g)$$

Конечная точка вектора $1/i$ лежитъ на параболѣ, фокусъ которой, не представленный на чертежѣ, лежитъ на оси абсциссъ въ разстояніи $\frac{k_2}{4}$ отъ вершины S.

При пускѣ въ ходъ $\varphi = 90^\circ$ и, слѣд., y въ равенствѣ (g) будетъ равно нулю, а обратное значеніе тока при пускѣ въ ходъ J_0 равно x. Соотвѣтственно этому равенство (g) даетъ:

$$\frac{1}{J_0} = OS = k_1.$$

Этимъ опредѣляется разстояніе OS. Оно измѣняется вмѣстѣ съ измѣненіемъ коэффиціента трансформаціи включеннаго послѣдовательно трансформатора. Сама же парабола даже при измѣненіи этого коэффиціента не мѣняется.



Фиг. 369.

Изъ чертежа на фиг. 369 мы можемъ сейчасъ найти отношеніе v числа оборотовъ къ синхронному числу оборотовъ. Выше мы нашли:

$$v = \frac{cos\varphi}{k_0}\cdot\frac{1}{i} = \frac{y}{k_0}\; .$$

Наконецъ, для вращающаго момента найдемъ выраженіе:

$$M_d = \frac{e\cdot i\cdot cos\varphi}{2\pi\cdot 9{,}81\cdot\frac{n}{60}} = \frac{e\cdot i\cdot cos\varphi}{2\pi\cdot 9{,}81\cdot\frac{\sim_1}{p}\cdot v}\; .$$

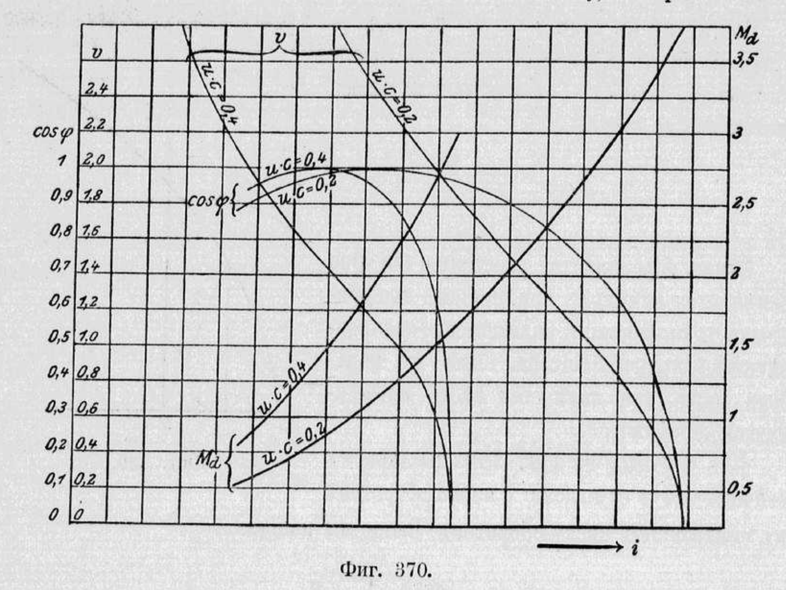
При помощи предыдущаго равенства получимъ:

$$M_d = \frac{p\cdot k_0\cdot e}{2\pi\cdot 9{,}81\cdot \sim_1}\cdot i^2\; .$$

Такимъ образомъ, для каждаго значенія φ могутъ быть послѣдовательно найдены $\cos\varphi$, $\frac{1}{i}$, v и M_d. Результаты эти представлены въ видѣ діаграммы на фиг. 370, при чемъ произвольно приняты:

$$\tau_2 = 0{,}1, \quad \tau = 0{,}2, \quad 3/\pi \cdot \frac{z}{e} = 1 \text{ и } \frac{p \cdot e}{2\,\tau \cdot 9{,}81 \cdot \text{[illegible]}_1} = 1;$$

для uc было принято послѣдовательно 0,2 и 0,4. Кривыя для M_d и v дали для двигателя Eichberg'a результатъ, подобный тому, который имѣетъ



Фиг. 370.

мѣсто для двигателей постояннаго тока. Эти кривыя въ общихъ чертахъ совпадаютъ съ кривыми, полученными на практикѣ[1]). Конечно, насыщеніе желѣза, которое мы оставили безъ вниманія, произведетъ нѣкоторое измѣненіе въ кривыхъ.

Эти кривыя показываютъ, что при неизмѣняющейся нагрузкѣ скорость увеличивается съ уменьшеніемъ коэффиціента трансформаціи u. Такъ какъ въ то же время уменьшается возбуждающій токъ, опредѣляемый произведеніемъ $u \cdot i$, то этотъ результатъ, по аналогіи съ двигателемъ постояннаго тока, не представляетъ ничего неожиданнаго.

---

[1]) См. Eichberg, *EZT* 1904, стр. 80.

Найдемъ, теперь, скорость v_0, при которой коэффиціентъ мощности равенъ единицѣ. Для этого въ равенствѣ (y) на основаніи фиг. 369 положимъ $x = 0$. Тогда мы получимъ:

$$y^2 = k_1 \cdot k_2.$$

Съ другой стороны, на основаніи послѣдняго выраженія для v на стр. 580:

$$y^2 = k_0^2 \cdot v_0^2.$$

Приравнивая эти выраженія, находимъ:

$$v_0^2 = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_0^2} = \frac{\pi^2}{9} \cdot \left(\frac{\tau}{(1+\tau_2)^2 \cdot u^2 \cdot c^2} + 1 \right).$$

Измѣняя надлежащимъ образомъ коэффиціентъ трансформаціи u, можно при любой скорости сдѣлать коэффиціентъ мощности равнымъ единицѣ. Если желательно этого достигнуть, не мѣняя въ то же время вращающаго момента, то нужно одновременно измѣнить полное напряженіе e.

Особенный интересъ представляетъ при различныхъ рабочихъ состояніяхъ распредѣленіе полнаго напряженія въ роторѣ и статорѣ, или при промежуточномъ включеніи послѣдовательно соединеннаго трансформатора — распредѣленіе напряженія въ трансформаторѣ и статорѣ. При пускѣ въ ходъ, т. е. при короткомъ замыканіи, если имѣть въ виду соединеніе на фиг. 363, обмотка статора и обмотка Y ротора представляютъ двѣ послѣдовательно соединенныя реакціонныя катушки. Создаваемыя дѣйствіемъ статора силовыя линіи X совершенно оттѣсняются при этомъ противодѣйствіемъ ротора на пути разсѣянія и поэтому появляются въ незначительномъ количествѣ; между тѣмъ создаваемыя тѣмъ же токомъ силовыя линіи въ обмоткѣ Y ротора безпрятственно проходятъ черезъ роторъ и воздушное пространство и поэтому появляются въ значительномъ количествѣ. Вслѣдствіе этого и противоэлектродвижущая сила въ роторѣ значительно больше, чѣмъ въ статорѣ. При этомъ почти все напряженіе расходуется въ роторѣ, т. е. у возбуждающихъ щетокъ.

Во время работы напряженіе у возбуждающихъ щетокъ принимаетъ опять значеніе $E_y - E_{rx}$ и при опредѣленномъ числѣ оборотовъ становится равнымъ нулю. Все напряженіе при этомъ расходуется въ статорѣ. Наконецъ, при дальнѣйшемъ увеличеніи числа оборотовъ разность $E_y - E_{rx}$ становится отрицательной. Двигатель тогда въ состояніи не только компенсировать безваттную составляющую напряженія въ статорѣ ($\varphi = 0$), но и поглощать (φ отрицательно) токъ, который опережаетъ напряженіе.

Коммутированіе въ щеткахъ короткаго замыканія происходитъ въ двигателѣ Eichberg'a, какъ и въ репульсіонномъ двигателѣ. Особенное явленіе обнаруживается въ катушкѣ, коротко замкнутой возбуждающими щетками. Силовой потокъ N_x индуктируетъ статическую электродвижущую силу, и потокъ N_y—динамическую электродвижущую силу. Эти силы относятся другъ къ другу, какъ $N_x : v \cdot N_y$. Такъ какъ статическія электродвижущія силы въ обмоткахъ ротора X и Y между собой относятся какъ соотвѣтствующіе потоки, то, принимая во вниманіе равенство (c) и (f), найдемъ:

$$\frac{N_x}{N_y} = \frac{E_x}{E_y} = \frac{3}{\pi} \cdot v.$$

Поэтому, если пренебречь коэффиціентомъ $\frac{3}{\pi}$, то $N_x = N_y$, т. е. электродвижущія силы статическая и динамическая въ катушкѣ, коротко замкнутой возбуждающими щетками, при всякомъ числѣ оборотовъ другъ другу равны. Что онѣ взаимно противоположны, вытекаетъ изъ понятія вращающагося поля (см. стр. 578).

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ.

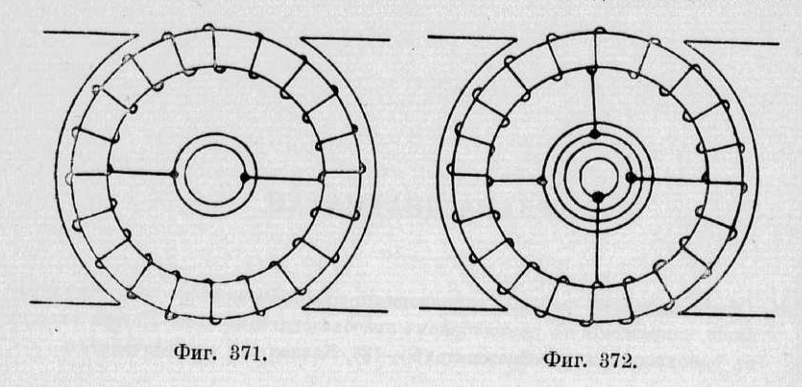
134. Общій принципъ работы одноякорнаго преобразователя.

Одноякорный преобразователь представляетъ собою машину постояннаго тока, у которой якорная обмотка присоединена не только къ коллектору, но и къ контактнымъ кольцамъ. Соотвѣтственно числу колецъ различаютъ преобразователи для однофазнаго тока (фиг. 371), для двуи четырехфазнаго тока (фиг. 372), для трехфазнаго тока (фиг. 373) и для шестифазнаго тока (фиг. 374). Шестифазный преобразователь получается просто изъ трехфазнаго трансформатора благодаря тому, что въ послѣднемъ вторичная обмотка не сопрягается. Вслѣдствіе этого токъ подводится къ преобразователю по шести путямъ. Конечно, такимъ образомъ мы собственно имѣемъ три отдѣльныя трехфазныя системы трансформатора. Но и шестифазный преобразователь можно безъ затрудненія разсматривать какъ систему изъ трехъ фазъ, у которой индуктирующіяся стороны катушекъ имѣютъ ширину полнаго полюснаго дѣленія, смѣщены относительно другъ друга на 120° и отчасти перекрываютъ одна другую.

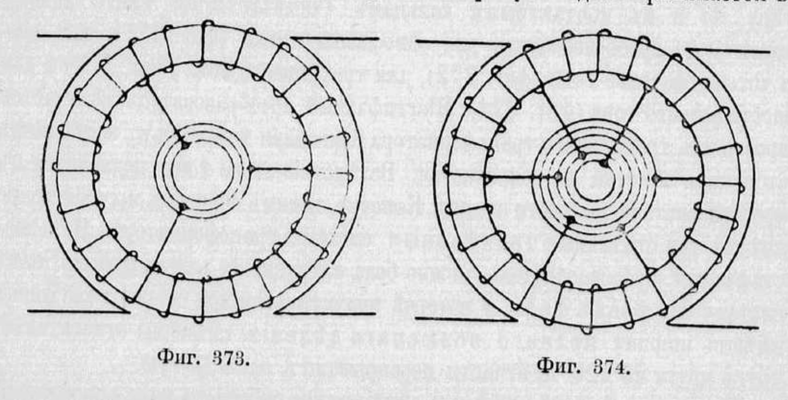
Одноякорный преобразователь обыкновенно работаетъ какъ однофазный, или многофазный синхронный двигатель перемѣннаго тока и какъ генераторъ постояннаго тока; но онъ можетъ работать какъ двигатель, питаемый со стороны постояннаго тока, и какъ генераторъ—со стороны перемѣннаго тока. Кромѣ того имъ можно пользоваться для одновременнаго добыванія постояннаго и перемѣннаго тока. Въ дальнѣйшемъ мы опишемъ

принципъ его дѣйствія какъ двигателя перемѣннаго тока и какъ генератора постояннаго тока.

Существенной особенностью одноякорнаго преобразователя является то обстоятельство, что электродвижущія силы постояннаго и перемѣннаго тока обусловливаются одинаковымъ силовымъ потокомъ и одинаковымъ числомъ


Фиг. 371. Фиг. 372.

оборотовъ. При этомъ подъ этимъ потокомъ мы разумѣваемъ не только потокъ, создаваемый электромагнитами, но и равнодѣйствующій потокъ, появляющійся въ якорѣ подъ вліяніемъ ампервитковъ электромагнитовъ и якоря, при чемъ самоиндукція якоря уже здѣсь принимается во


Фиг. 373. Фиг. 374.

вниманіе. Если пренебречь омической потерей напряженія, то, на основаніи стр. 399, мѣрой для силового потока является напряженіе у зажимовъ, а не магнитное возбужденіе машины перемѣннаго тока.

Отсюда вытекаетъ, что при отсутствіи особыхъ приспособленій напряженія у зажимовъ для перемѣннаго и постояннаго тока находятся въ совершенно опредѣленномъ соотношеніи. Разсмотримъ ради простоты двухполюсную машину; у нея напряженіе постояннаго тока равно $N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8}$, между тѣмъ какъ напряженіе перемѣннаго тока опредѣляется, на основаніи стр. 381, равенствомъ

$$E_w = k \cdot N \cdot \sim \cdot \frac{z}{\nu} \cdot 10^{-8},$$

гдѣ ν число каналовъ якоря. Число этихъ каналовъ при однофазномъ токѣ равно 2, при двух- и четырехфазномъ токѣ равно 4, при трехфазномъ токѣ равно 3 и при шестифазромъ равно 6. Коэффиціентъ k зависитъ отъ очертанія поля, полюсной дуги β и отъ ширины 2γ индуктирующейся стороны катушки одной фазы. Такъ какъ въ нашей двухполюсной машинѣ $\sim$ равно $\frac{n}{60}$, то получаемъ отношеніе:

$$\frac{E_w}{E} = \frac{k}{\nu} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (a)$$

Это равенство сохраняетъ силу и для машинъ съ большимъ числомъ полюсовъ. На основаніи уравненій на стр. 383, получаемъ слѣдующую таблицу:

	ν	$2\gamma/\pi$	Значенія коэффиціента k.		
			Синусоидальное.	$\beta/\pi = 2/3$	$\beta/\pi = 1/2$
Однофазный . . .	2	1	$\sqrt{2}$	$2/3\sqrt{5}$	$2/3\sqrt{6}$
Трехфазный . . .	3	$2/3$	$3/4\sqrt{6}$	$1/2\sqrt{15}$	$2/3\sqrt{10}$
Четырехфазный. .	4	$1/2$	2	$2/3\sqrt{10}$	$4/3\sqrt{3}$
Шестифазный . .	6	$1/3$	$3/2\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	$2/3\sqrt{14}$

Напримѣръ, при синусоидальномъ полѣ для однофазнаго тока $\frac{k}{\nu}$, т. е. отношеніе напряженія перемѣннаго тока къ напряженію постояннаго тока равно 0,707. Этотъ результатъ подтверждается тѣмъ соображеніемъ, что наибольшаго значенія напряженіе перемѣннаго тока достигаетъ тогда, когда подводящіе къ контактнымъ кольцамъ витки на фиг. 371 такъ же, какъ

и щетки постояннаго тока лежатъ въ нейтральномъ поясѣ. Слѣдовательно, наибольшее значенiе напряженiя перемѣннаго тока для однофазнаго тока и синусоидальнаго поля равно напряженiю постояннаго тока; дѣйствующее значенiе, слѣдовательно, въ 0,707 разъ больше.

То обстоятельство, что напряженiе перемѣннаго и постояннаго токовъ суть величины одного порядка, вызываетъ необходимость при преобразованiи перемѣннаго тока высокаго напряженiя въ постоянный примѣнять неподвижный трансформаторъ. Это увеличиваетъ стоимость установки. Но всетаки при этомъ издержки не такъ велики, какъ при преобразованiи посредствомъ моторъ-генератора.

Вычислимъ теперь соотношенiе силы тока на сторонѣ перемѣннаго тока къ послѣдней на сторонѣ постояннаго тока. Пусть i_{max} будетъ наибольшее значенiе перемѣннаго тока въ одной вѣтви обмотки якоря и φ—сдвигъ фазъ между электродвижущей силой и силой тока. Тогда мощность перемѣннаго тока во всѣхъ каналахъ будетъ:

$$P_w = \nu \cdot E_w \cdot \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \cdot \cos\varphi$$

Мощность постояннаго тока, если черезъ c обозначить его силу въ одной вѣтви обмотки якоря, выразится:

$$P = 2E \cdot c.$$

Пренебрегая потерями, на основанiи начала сохраненiя энергiи можемъ считать обѣ мощности равными другъ другу. Тогда, принимая во вниманiе равенство (a), найдемъ отношенiя η наибольшаго значенiя перемѣннаго тока къ постоянному:

$$\eta = \frac{i_{max}}{c} = \frac{2\cdot\sqrt{2}}{\nu\cdot\cos\varphi}\cdot\frac{E}{E_w} = \frac{2\cdot\sqrt{2}}{k\cdot\cos\varphi} \quad \ldots\ldots \quad (b)$$

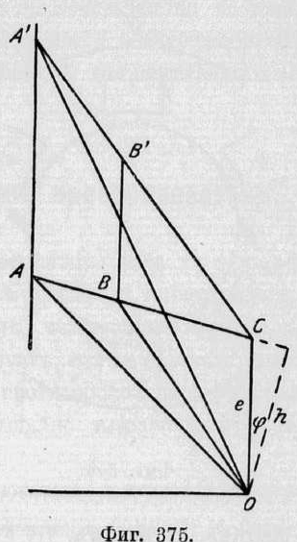
Это равенство сохраняетъ силу и для многополюсныхъ машинъ.

Какъ и при всякомъ синхронномъ двигателѣ, можно величинѣ коэффицiента мощности $\cos\varphi$ придавать произвольное значенiе, измѣняя при этомъ возбужденiе. При постоянномъ напряженiи перемѣннаго тока и, слѣдовательно, постоянномъ равнодѣйствующемъ силовомъ потокѣ съ измѣненiемъ возбужденiя мѣняется естественнымъ образомъ величина и фаза перемѣннаго тока, но равнодѣйствующее возбужденiе остается постояннымъ.

Изъ этого вытекаетъ, что безъ особыхъ приспособленiй однимъ измѣненiемъ возбужденiя немыслимо влiять на напряженiе постояннаго тока.

135. Регулированiе напряженiя въ одноякорномъ преобразователѣ.

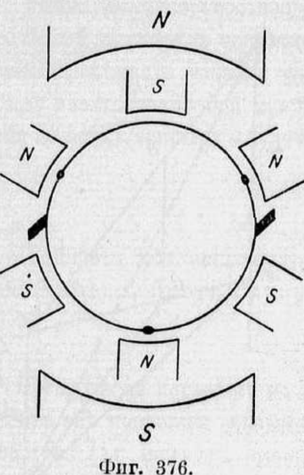
Регулированiе напряженiя въ одноякорномъ преобразователѣ достигается включенiемъ реакцiонной катушки со стороны перемѣннаго тока. Пусть будетъ напряженiе въ сѣти перемѣннаго тока e и индуктивное сопротивленiе реакцiонной катушки x. Преобразователь перевозбуждается, такимъ образомъ напряженiе у его зажимовъ, на основанiи сказаннаго на стр. 458 отстаетъ отъ тока (фиг. 375). Мы предполагаемъ, что наша машина работаетъ какъ двигатель перемѣннаго тока. Поэтому векторъ OA, уравновѣшивающiй индуктируемую только однимъ возбужденiемъ электромагнитовъ электродвижущую силу, отстаетъ отъ напряженiя на уголъ COA. Если пренебречь омической потерей, то векторъ $BC = i\cdot x$ представляетъ индуктивную потерю напряженiя въ реакцiонной катушкѣ, и векторъ $BA = L\omega\cdot i$ — такую же потерю въ преобразователѣ. Напряженiе у зажимовъ преобразователя, пропорцiональное силовому потоку и напряженiю постояннаго тока, въ этомъ случаѣ равно OB, а не OC. Можно доказать, что, измѣняя возбужденiе, мы можемъ измѣнить и напряженiе у зажимовъ. Ради упрощенiя допустимъ, что мощность преобразователя $e\cdot i\cdot\cos\varphi$ остается постоянной. Такъ какъ $e\cdot\cos\varphi$ равно высотѣ h треугольника OAC, и AC пропорцiонально току, то постоянная мощность пропорцiональна площади AOC. По нашему предположенiю, эта площадь постоянной величины. Если векторъ e, который мы теперь примемъ за основанiе треугольника OAC, сдѣлать неподвижнымъ, то при измѣненiи возбужденiя точка A перемѣщается по прямой, параллельной OC, напримѣръ, къ точкѣ A'. Точка B дѣлитъ векторъ полной индуктивной потери напряженiя въ постоянномъ отношенiи; поэтому B также перемѣщается по прямой, параллельной OC, по направленiю къ B'. Увеличивая возбужденiе, мы увеличиваемъ не только векторъ OA, но и векторъ OB, который пропорцiоналенъ напряженiю постояннаго тока. Одновременно увеличивается сила тока и отрицательный сдвигъ фазъ.



Фиг. 375.

Другой способъ измѣненія напряженія постояннаго тока при данномъ напряженіи перемѣннаго тока состоитъ въ томъ, что щетки постояннаго тока выдвигаются изъ нейтральнаго пояса, такимъ образомъ одна часть постояннаго тока оказывается въ большей или меньшей степени передъ противоположными полюсами. Этотъ способъ ведетъ къ примѣненію полюсовъ съ зазорами, подобно тому какъ это имѣетъ мѣсто на фиг. 124, но еще съ бо́льшимъ пазомъ.

Такіе полюсы можно рекомендовать для измѣненія соотношенія между напряженіемъ постояннаго и перемѣннаго тока путемъ введенія волнъ съ болѣе высокимъ числомъ періодовъ. Въ этомъ случаѣ полюсы возбуждаются съ неодинаковой силой. Лучше всего представить себѣ ихъ равнозначущими парѣ полюсовъ, соотвѣтствующихъ простому числу періодовъ и расположенныхъ сверху полюсовъ для высшаго числа періодовъ. Число добавочныхъ полюсовъ выбрано такъ, чтобы они оказывали вліяніе только на напряженіе постояннаго, а не перемѣннаго тока. Разсмотримъ для примѣра двухполюсный трехфазный преобразователь, представленный на фиг. 376. Мы видимъ, что ширина катушки обнимаетъ два полныхъ дѣленія добавочныхъ перемѣнныхъ полюсовъ.



Фиг. 376.

Такимъ образомъ, индуктируемая въ ней электродвижущая сила при синусоидальномъ полѣ въ каждый моментъ равна нулю [1]). Напротивъ, мы видимъ, что каналъ якоря постояннаго тока подверженъ вліянію со стороны двухъ одноименныхъ и одного разноименнаго добавочнаго вспомогательнаго полюса; слѣдовательно, напряженіе въ немъ можно регулировать, измѣняя возбужденіе вспомогательнаго полюса.

---

[1]) Въ нашемъ случаѣ электродвижущія силы съ тройнымъ числомъ періодовъ вообще не индуктируются; поэтому токи съ тройнымъ числомъ періодовъ не могутъ попасть въ сѣть. Возможность послѣдняго случая исключается, впрочемъ, при всякой трехфазной обмоткѣ, даже если ширина индуктирующейся стороны катушки не равна $^2/_3$ полюснаго дѣленія. Чтобы убѣдиться въ томъ, что сказанное дѣйствительно и для соединенія треугольникомъ, вообразимъ на фиг. 376, что три витка распредѣлены передъ серединой одноименныхъ вспомогательныхъ полюсовъ и соединены треугольникомъ. Тогда мы увидимъ, что индуктируемый въ одномъ виткѣ токъ полностью идетъ затѣмъ по второму витку, и въ сѣть, слѣдовательно, не попадаетъ.

Однако, нѣтъ необходимости примѣнять двѣ отдѣльныя системы полюсовъ. Можно одну систему наложить на другую, т. е. главный полюсъ раздѣлить на три части, и на полученные такимъ образомъ полюсы наложить обмотки, поддающіяся регулированію. Эти обмотки даютъ возможность измѣнять силу средняго полюса сравнительно съ обоими крайними.

Такого же результата можно достигнуть, раздѣливъ каждый полюсъ (фиг. 124) на двѣ части и возбуждая эти части съ неодинаковой силой. Конечно, при этомъ мы не получимъ синусоидальной кривой для электродвижущей силы. Принципъ регулированія соотношенія напряженія постояннаго тока къ напряженію перемѣннаго тока основывается на томъ, что индуктируемыя каждымъ полюсомъ въ отдѣльности электродвижущія силы для постояннаго тока слагаются алгебраически, для перемѣннаго же геометрически.

136. Потеря энергіи въ одноякорномъ преобразователѣ.

Электродвижущія силы постояннаго и перемѣннаго тока въ обмоткѣ якоря имѣютъ одинаковое направленіе; токъ въ двигателѣ имѣетъ направленіе противоположное электродвижущей силѣ, между тѣмъ какъ токъ въ генераторѣ съ ней совпадаетъ. Отсюда слѣдуетъ, что въ обмоткѣ якоря перемѣнный и постоянный токи другу другъ противоположны и отчасти взаимно уравновѣшиваются. Послѣднее чрезвычайно выгодно въ смыслѣ уменьшенія тепла Джоуля въ якорѣ.

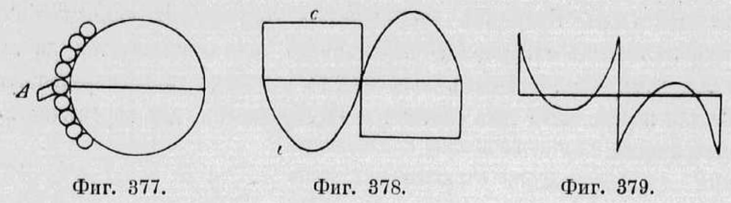
Мы въ дальнѣйшемъ разсмотримъ преобразователь, который питается перемѣннымъ токомъ и работаетъ, слѣдовательно, какъ двигатель перемѣннаго тока и какъ генераторъ постояннаго тока.

Но далѣе выясняется, что этотъ благопріятный результатъ имѣетъ мѣсто только тогда, когда между электродвижущей силой и силой перемѣннаго тока нѣтъ никакого сдвига фазъ. Кромѣ того, индуктирующая сторона катушки перемѣннаго тока порою находится въ одно и то же время передъ разноименными полюсами, и тогда ясно, что въ однихъ отдѣльныхъ проволокахъ будетъ происходить сложеніе, въ другихъ вычитаніе. Понятно, самымъ выгоднымъ было бы безконечно большое число коллекторныхъ пластинъ и безконечно большое число фазъ, т. е. безконечно малая ширина индуктирующейся стороны катушки.

Для пониманія и теоретическаго обоснованія будетъ проще, если мы возьмемъ число пластинъ на коллекторѣ очень большимъ и если разсмо-

тримъ измѣненіе тока по времени въ одномъ только виткѣ [1]). Для этого мы возьмемъ сначала витокъ, составляющій середину индуктирующейся стороны катушки и предположимъ сдвигъ фазъ равнымъ нулю, что всегда можетъ быть достигнуто соотвѣтствующимъ возбужденіемъ.

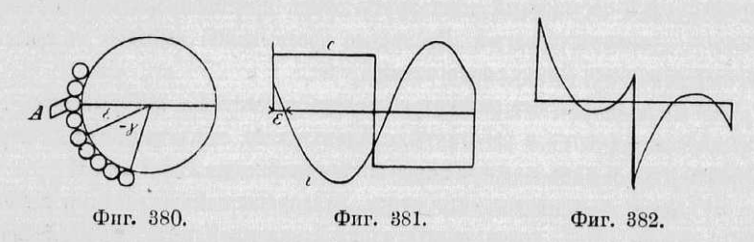
Какъ только проволока разсматриваемаго витка на фиг. 377 пройдетъ нейтральную линію, то какъ постоянный, такъ и перемѣнный токи мѣняютъ свое направленіе на обратное. Кривая c на фиг. 378 представляетъ намъ измѣненіе постояннаго тока по времени въ разсматриваемомъ виткѣ. Равнымъ образомъ кривая i — измѣненіе перемѣннаго тока. Суммируя оба



Фиг. 377. Фиг. 378. Фиг. 379.

тока и принимая во вниманіе также ихъ знаки, получаемъ кривую тока на фиг. 379. Чтобы получить мгновенное значеніе энергіи, мы должны возвысить въ квадратъ ординаты и умножить на сопротивленіе w разсматриваемаго витка.

Хуже эти соотношенія для витка, который удаленъ на дугу ε отъ середины индуктирующейся стороны катушки (фиг. 380). Какъ только этотъ



Фиг. 380. Фиг. 381. Фиг. 382.

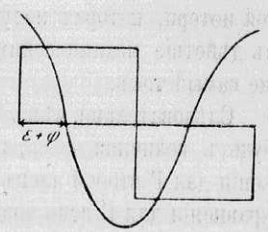
витокъ при A пройдетъ черезъ нейтральную линію, происходитъ измѣненіе направленія постояннаго тока. Измѣненіе направленія перемѣннаго тока, наоборотъ, произойдетъ на длину дуги ε позднѣе, т. е. когда середина индуктирующейся стороны катушки пройдетъ черезъ нейтральную линію, такъ какъ сдвигъ фазъ, по нашему предположенію, равенъ нулю. Кривая перемѣннаго тока, какъ видимъ на фиг. 381, сдвинется вправо, и при сло-

[1]) Cp. Steinmetz, «Der rotierende Umformer in Voits Sammlung elektrotechnischer Vorträge». Bd II, 1889.

женіи ординатъ мы получаемъ кривую фиг. 382, которая представитъ намъ измѣненіе по времени тока въ разсматриваемомъ виткѣ.

Если, наконецъ, токъ будетъ отставать отъ электродвижущей силы на уголъ φ, то, какъ увидимъ, кривая тока перемѣстится еще больше вправо на дугу φ (фиг. 383). При этомъ, ради упрощенія, въ качествѣ абсциссъ, какъ и въ прежнихъ статьяхъ, отложена дуга α, соотвѣтствующая времени t. Мгновенное значеніе тока въ разсматриваемомъ виткѣ тогда будетъ:

$$c - i_{max}\cdot \sin(\alpha - \varepsilon - \varphi) = c\,[1 - \eta\cdot\sin(\alpha - \varepsilon - \varphi)].$$



Фиг. 383.

Возвысимъ въ квадратъ мгновенное значеніе тока и возьмемъ среднее значеніе между 0 и π. Если w будетъ сопротивленіемъ витка, то для средней по времени потери энергіи въ разсматриваемомъ виткѣ получаемъ:

$$\frac{c^2\cdot w}{\pi}\int_0^{\pi}\Big\{1 - \eta\cdot\sin(\alpha-\varepsilon-\varphi)\Big\}^2\cdot d\alpha = c^2\cdot w\Big\{1 + \frac{\eta^2}{2} - \frac{4\eta}{\pi}\cdot\cos(\varepsilon + \varphi)\Big\}.$$

При этомъ интегрированіе было произведено послѣ возвышенія въ квадратъ, при чемъ ε принималось за постоянную. Какъ указываютъ большія скобки правой части, средняя потеря энергіи имѣетъ два постоянныхъ члена, которые для всѣхъ витковъ одни и тѣ же, и третій членъ, величина котораго измѣняется съ измѣненіемъ въ пространствѣ угла ε. Среднее значеніе этого члена въ скобкахъ, принимая во вниманіе только измѣненія въ пространствѣ, будетъ:

$$\frac{1}{2\gamma}\int_{-\gamma}^{+\gamma}\frac{4\eta}{\pi}\cdot\cos(\varepsilon+\varphi)\cdot d\varepsilon = \frac{4\eta}{\pi}\cdot\frac{\sin\gamma}{\gamma}\cdot\cos\varphi,$$ если 2γ ширина катушки.

Слѣдовательно, средняя потеря энергіи по времени и пространству и на витокъ равна:

$$P_v = c^2\cdot w\left(1 + \frac{\eta^2}{2} - \frac{4\eta}{\pi}\cdot\frac{\sin\gamma}{\gamma}\cdot\cos\varphi\right).$$

Подставляя, теперь, вмѣсто η раньше найденное значеніе ея $\frac{2\cdot\sqrt{2}}{k\cdot\cos\varphi}$, получаемъ:

$$P_v = c^2\cdot w\left(1 + \frac{4}{k^2\cdot\cos^2\varphi} - \frac{3,6}{k}\cdot\frac{\sin\gamma}{\gamma}\right).$$

Въ этомъ уравненіи произведеніе $c^2\cdot w$ представляетъ собою потерю энергіи на витокъ, когда машина работаетъ, какъ генераторъ постояннаго

тока, и доставляетъ при этомъ постоянный токъ *c*. Выраженіе въ скобкахъ:

$$\Gamma = 1 + \frac{4}{k^2 \cdot cos^2 \varphi} - \frac{3,6}{k} \cdot \frac{sin\,\gamma}{\gamma}$$

указываетъ, во сколько разъ потеря энергіи въ преобразователѣ больше той потери, которая получается тогда, когда та же машина, приводимая въ дѣйствіе механическимъ путемъ, доставляетъ, какъ генераторъ, тотъ же самый токъ.

Слѣдовательно, чѣмъ больше будетъ уголъ сдвига фазъ φ, тѣмъ меньше будетъ величина $cos\varphi$, тѣмъ больше будетъ въ вышеуказанномъ уравненіи для Г второй членъ, а, слѣдовательно, и потеря. Далѣе, изъ того же уравненія для Г ясно видно вліяніе, оказываемое шириною катушки. Если, напримѣръ, поле синусоидальное, то коэффиціентъ k пропорціоналенъ величинѣ $\frac{sin\,\gamma}{\gamma}$, т. е. послѣдній членъ въ уравненіи для Г будетъ постояненъ для любой ширины катушки. Поэтому вліяніе ширины катушки имѣетъ значеніе только для второго члена. Чѣмъ меньше ширина катушки, тѣмъ больше будетъ коэффиціентъ k. Второй же членъ вышеуказаннаго уравненія будетъ меньше, а потому и потеря энергіи будетъ также меньше. Такимъ образомъ, преимущество шестифазнаго преобразователя, получающееся вслѣдствіе незначительной ширины его катушки,—очевидно. Если поле будетъ не синусоидальное, то эти соотношенія измѣнятся все же очень мало.

Нижеуказанная таблица заключаетъ въ себѣ для различныхъ случаевъ значенія Г, т. е. отношеніе потери въ преобразователѣ къ потерѣ въ генераторѣ при одной и той же силѣ постояннаго тока.

	$cos\,\varphi$	$\Gamma = 1 + \frac{4}{k^2 cos^2 \varphi} - \frac{3,6}{k} \cdot \frac{sin\,\gamma}{\gamma}$		
		Синусоидальное поле.	$\beta/\pi = 2/3$	$\beta/\pi = 1/2$
Однофазный	1	1,38	1,26	1,10
	0,8	2,50	2,28	1,94
Трехфазный	1	0,56	0,53	0,49
	0,8	1,23	1,13	0,99
Четырехфазный . . .	1	0,38	0,36	0,35
	0 8	0,94	0,87	0,77
Шестифазный. . . .	1	0,27	0,26	0,26
	0,8	0,77	0,71	0,63

Таблица указываетъ, что потери значительно уменьшаются, если посредствомъ соотвѣтствующаго возбужденія машины озаботиться о томъ, чтобы сдвигъ фазъ равнялся нулю. Далѣе, та же таблица указываетъ чрезвычайное преимущество многофазнаго преобразователя передъ однофазнымъ. Вліяніе формы полюса, согласно таблицѣ, очень незначительно и, въ дѣйствительности, вслѣдствіе закругленія концовъ полюса, будетъ имѣть еще меньшее значеніе.

Для практическихъ цѣлей насъ интересуетъ еще одинъ вопросъ: насколько сильно мы можемъ нагружать вращающійся преобразователь, не вызывая нагрѣва якоря. Пусть въ предположеніи одинаковыхъ потерь обозначаютъ:

c постоянный токъ на проволоку якоря, доставляемый преобразователемъ,

c_1 токъ, который доставляетъ та же машина, какъ механически приводимый въ дѣйствіе генераторъ.

При этомъ потеря на индуктирующуюся сторону катушки въ генераторѣ будетъ $c_1^2 \cdot w$, а въ преобразователѣ $\Gamma \cdot c^2 \cdot w$. Если обѣ потери должны быть равны другъ другу, то имѣемъ:

$$c_1^2 \cdot w = \Gamma \cdot c^2 \cdot w$$

или

$$\frac{c}{c_1} = \frac{1}{\sqrt{\Gamma}}.$$

Слѣдовательно, при предположеніи одинаковыхъ потерь въ якорѣ, отношеніе постояннаго тока въ преобразователѣ къ постоянному току въ генераторѣ выражается величиною $\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}$. Это выраженіе даетъ и отношеніе мощностей обѣихъ машинъ въ предположеніи одинаковаго нагрѣва якоря. Въ нижеприведенной таблицѣ приведены значенія $\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}$ для различныхъ частныхъ случаевъ.

	$cos\,\varphi$	$1/\sqrt{\Gamma}$		
		Синусоидальное поле.	$\beta/\pi = 2/3$	$\beta/\pi = 1/2$
Однофазный	1	0,85	0,89	0,95
	0,8	0,63	0,66	0,72
Двухфазный	1	1,33	1,37	1,43
	0,8	0,90	0,94	1,00

	$\cos\varphi$	$1/\sqrt{\Gamma}$		
		Синусоидальное поле.	$\beta/\pi = 2/3$	$\beta/\pi = 1/2$
Четырехфазный	1	1,62	1,66	1,70
	0,8	1,03	1,07	1,14
Шестифазный.	1	1,93	1,95	1,94
	0,8	1,14	1,18	1,26

Такимъ образомъ, при коэффиціентѣ мощности $\cos\varphi = 1$ однофазный преобразователь при одномъ и томъ же нагрѣвѣ якоря даетъ 85% того, что даетъ генераторъ постояннаго тока. Но шестифазный преобразователь при $\cos\varphi = 1$ даетъ почти вдвое больше генератора постояннаго тока, при чемъ нагрѣваніе не превосходитъ допускаемой величины.

137. Каскадный преобразователь.

Каскадный преобразователь (патентъ Bragstadt—La Cour'а) состоитъ изъ асинхроннаго трехфазнаго двигателя и соединеннаго съ нимъ одноякорнаго преобразователя. Сторона перемѣннаго тока въ преобразователѣ посредствомъ группы соединительныхъ проводовъ питается роторомъ трехфазнаго двигателя. Если p_e число паръ полюсовъ въ одноякорномъ преобразователѣ, ν число періодовъ скольженія въ асинхронномъ двигателѣ, т. е. число періодовъ тока въ преобразователѣ, то мы имѣемъ уравненіе:

$$\nu = p_e \cdot \frac{n}{60}.$$

Если, съ другой стороны, p_d число паръ полюсовъ въ трехфазномъ двигателѣ и ν_1 число періодовъ тока въ статорѣ, то для скольженія имѣемъ уравненіе:

$$\nu = \nu_1 - p_d \cdot \frac{n}{60}.$$

Сравнивая оба значенія для ν, находимъ:

$$\frac{n}{60} = \frac{\nu_1}{p_e + p_d}.$$

Число оборотовъ каскаднаго преобразователя, слѣдовательно, равно числу оборотовъ трехфазнаго двигателя съ числомъ полюсовъ, равнымъ

суммѣ полюсовъ у обѣихъ машинъ. При равномъ числѣ полюсовъ на обѣихъ машинахъ число оборотовъ будетъ вдвое меньше, чѣмъ въ томъ случаѣ, когда трехфазный двигатель одинъ включенъ въ сѣть.

Незначительное число оборотовъ при дѣйствительномъ числѣ полюсовъ трехфазнаго двигателя, или, наоборотъ, незначительное число полюсовъ при небольшомъ, требуемомъ въ большинствѣ случаевъ условіями работы, числѣ оборотовъ, представляютъ серьезное преимущество каскаднаго преобразователя.

По незначительности потери энергіи въ синхронной машинѣ каскадный преобразователь приближается къ одноякорному преобразователю, хотя немного и уступаетъ ему въ этомъ отношеніи. Для упрощенія примемъ число полюсовъ на обѣихъ машинахъ одинаковымъ. Тогда:

$$\frac{n}{60} = \frac{\nu_1}{2p_d}.$$

Такъ какъ $\frac{\nu_1}{p_d}$ число оборотовъ поля статора въ трехфазномъ двигателѣ, то скольженіе составляетъ 50%. При этомъ половина сообщенной ротору трехфазнаго двигателя мощности расходуется на механическую работу приведенія во вращеніе ротора. Эта работа черезъ валъ передается машинѣ постояннаго тока, которая такимъ образомъ приводится въ дѣйствіе какъ генераторъ. Другую половину мощности, какъ и при трехфазномъ двигателѣ съ пусковымъ реостатомъ, роторъ отдаетъ въ видѣ электрической энергіи. Послѣдняя передается синхронной машинѣ, которая такимъ образомъ, какъ одноякорный преобразователь, получаетъ перемѣнный токъ и отдаетъ постоянный токъ. Преимущества незначительной потери энергіи обнаруживаются здѣсь такъ же, какъ и при одноякорномъ преобразователѣ. Конечно, машина теперь является наполовину одноякорнымъ преобразователемъ. Но зато она представляетъ нѣкоторыя преимущества въ томъ отношеніи, что безъ затрудненій можно увеличивать число фазъ одноякорнаго преобразователя, такъ какъ токъ подводится не черезъ контактныя кольца.

Для отдѣльныхъ фазъ ротора асинхроннаго трехфазнаго двигателя принято соединеніе звѣздой. При пускѣ въ ходъ со стороны трехфазнаго тока три фазы соединяются другъ съ другомъ при посредствѣ сопротивленія въ узловой точкѣ звѣзды и послѣ пуска всѣ фазы въ этой точкѣ коротко замыкаются.

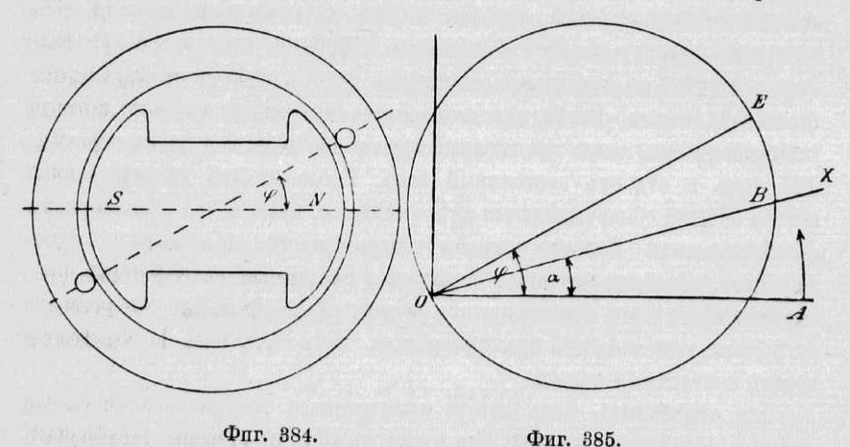
ПРИБАВЛЕНІЕ.

Символическія изображенія величинъ перемѣннаго тока.

Согласно Steinmetz, «Theorie und Berechnung der Wechselstromerscheinungen».

1. Полярная діаграмма.

Раньше въ діаграммѣ векторовъ наибольшее значеніе напряженія или силы тока мы откладывали въ видѣ векторовъ и заставляли эти вектора вращаться. Направленіе радіуса вектора соотвѣтствовало тогда перемѣн-



Фиг. 384. Фиг. 385.

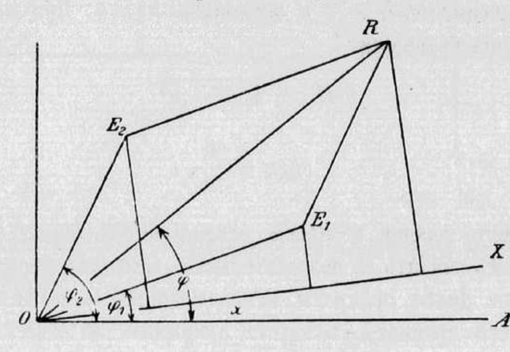
ному въ пространствѣ положенію катушки якоря, и мгновенное значеніе напряженія получалось проэктированіемъ вектора на ось ординатъ.

Въ противоположность этому, мы теперь, на фиг. 384, будемъ считать катушку якоря неподвижною, а заставимъ вращаться электромагниты. Пусть начальное положеніе магнитной оси электромагнитовъ совпадаетъ

на фигурѣ съ осью абсциссъ и пусть плоскость, проведенная черезъ индуктирующіяся стороны катушки, которыя неподвижны, образуетъ съ начальнымъ положеніемъ постоянный уголъ φ. Въ полярной діаграммѣ (фиг. 385) мы ось абсциссъ примемъ также за начальное положеніе и проведемъ векторъ $OE = E_{max}$ по направленію, опредѣляемому угломъ φ. На OE, какъ на діаметрѣ, построимъ затѣмъ окружность. Примемъ OE за неподвижный векторъ, а векторъ OX заставимъ вращаться противъ часовой стрѣлки. Когда этотъ векторъ отойдетъ отъ начальнаго положенія на уголъ α, то онъ пересѣчетъ окружность въ точкѣ B. Мгновенное значеніе элоктродвижущей силы тогда будетъ:

$$E_{max} \cdot \cos(\varphi - \alpha) = OB.$$

Мы назовемъ діаметръ E_{max} амплитудою волны, а уголъ φ фазою волны. Слѣдовательно, въ полярныхъ координатахъ мгновенное значеніе



Фиг. 386.

выражается въ видѣ функціи угла α. Наибольшее значеніе достигается въ тотъ моментъ, когда вращающійся векторъ OX совпадаетъ съ діаметромъ OE.

На фиг. 386, напримѣръ, электродвижущія силы E_1 и E_2 будутъ разныхъ фазъ, такъ какъ ихъ наибольшія значенія образуютъ съ начальнымъ положеніемъ различные углы φ_1 и φ_2. Электродвижущая сила E_2 отстаетъ по фазѣ отъ электродвижущей силы E_1, такъ какъ вращающійся векторъ OX совпадаетъ сначала съ OE_1 и уже затѣмъ съ OE_2. Оказывается, что при вращеніи вектора OX противъ часовой стрѣлки мы получаемъ точно такую же фигуру, какую имѣли раньше—при вращеніи наибольшихъ значеній по часовой стрѣлкѣ.

2. Геометрическое сложеніе.

Согласно фиг. 385, мгновенное значеніе выражается отрѣзкомъ OB, т. е. проэкціей діаметра OE на вращающійся векторъ OX. Отсюда вытекаетъ, подобно тому, какъ на стр. 385, что обѣ электродвижущія силы OE_1 и OE_2 на фиг. 386 мы можемъ замѣнить одною равнодѣйствующей, амплитуда которой будетъ равняться OR и фаза которой будетъ φ.

Въ дальнѣйшемъ мы пренебрежемъ мгновеннымъ значеніемъ и станемъ разсматривать только наибольшее значеніе (амплитуду) и фазу волны. Само собою понятно, что мы можемъ опять, какъ раньше, вмѣсто наибольшихъ значеній отложить дѣйствующія значенія, такъ какъ отъ этого измѣнится только масштабъ. Какъ мы видимъ, волна задается ея амплитудою и фазою. Но мы можемъ вмѣсто амплитуды и фазы ввести прямоугольные координаты діаметра OE. Подобнымъ образомъ волна фиг. 387 опредѣлится абсциссою $a = 3$ и ординатою $b = 4$. При этомъ имѣютъ мѣсто слѣдующія уравненія:

$$OE = \sqrt{a^2 + b^2}$$

и

$$tg\,\varphi = \frac{b}{a}.$$

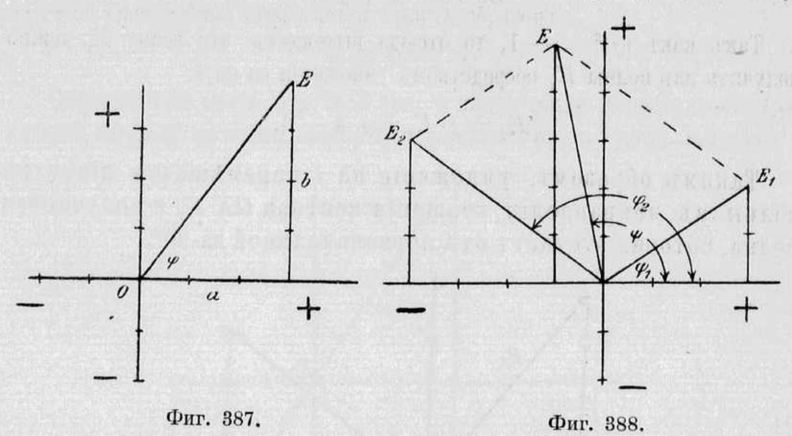
Какъ принято вообще, абсциссы, откладываемыя вправо отъ оси ординатъ, мы будемъ считать за положительныя, а откладываемыя влѣво—за отрицательныя. Далѣе, ординаты, откладываемыя въ положительномъ направленіи оси ординатъ, слѣдуетъ принимать за мнимыя положительныя величины, а въ отрицательномъ направленіи—за мнимыя отрицательныя. Такъ какъ буквою i мы уже пользовались для обозначенія силы тока, то для мнимаго числа $\sqrt{-1}$ возьмемъ букву j. Тогда для символическаго представленія перемѣнной волны на фиг. 387,—если E будетъ обозначать амплитуду,—будетъ имѣть мѣсто уравненіе:

$$E = 3 + j \cdot 4.$$

Вообще,—какъ поступаетъ и Steinmetz въ своемъ трудѣ «Teorie und Berechnung der Wechselstromerscheinungen»,—для обозначенія амплитудъ мы возьмемъ прописныя буквы, а для проэкцій на оси—строчныя буквы.

Проэкція равнодѣйствующей, согласно стр. 312, равна суммѣ проэкцій составляющихъ [1]). Слѣдовательно, если даны, напримѣръ, двѣ волны различныхъ фазъ, то мы можемъ, теперь, произвести геометрическое сложеніе путемъ расчета, вмѣсто употреблявшагося нами раньше графическаго способа. На фиг. 388 даны электродвижущія силы E_1 и E_2, фазы которыхъ φ_1 и φ_2, и ихъ равнодѣйствующая, амплитуда которой E и фаза φ. Опредѣленіе амплитуды при помощи тригонометрическихъ формулъ явилось бы очень затруднительнымъ. Графическій способъ также довольно утомителенъ, когда по заданнымъ угламъ φ_1 и φ_2 нужно получить направленіе E_1 и E_2. Наоборотъ, символическій методъ состоитъ только въ сложеніи:

[1]) На ту же ось. Ред.



Фиг. 387. Фиг. 388.

$$E_1 = +3 + j \cdot 2$$
$$E_2 = -4 + j \cdot 3$$
$$E = E_1 + E_2 = -1 + j \cdot 5$$

Какъ видимъ, геометрическое сложеніе, которое для насъ раньше было только способомъ выраженія, на самомъ дѣлѣ состоитъ въ дѣйствіи сложенія. Знакъ $+$ между E_1 и E_2 означаетъ геометрическое сложеніе. Взглянувъ на фиг. 388, мы видимъ, что геометрическая равнодѣйствующая дѣйствительно имѣетъ координатами -1 и $+j \cdot 5$. Если же желательно отъ комплексныхъ величинъ перейти обратно къ простымъ, то въ полученномъ результатѣ надо положить:

$$E = \sqrt{(-1)^2 + 5^2} = \sqrt{26}$$

и

$$tg\varphi = \frac{+5}{-1} = -5.$$

3. Вращеніе вектора волны.

Мы разсмотримъ на фиг. 389 двѣ электродвижущія силы одинаковой амплитуды, изъ которыхъ E_2 отстаетъ отъ E_1 на 90°. Какъ видимъ:

$$E_1 = +4 + j \cdot 3$$

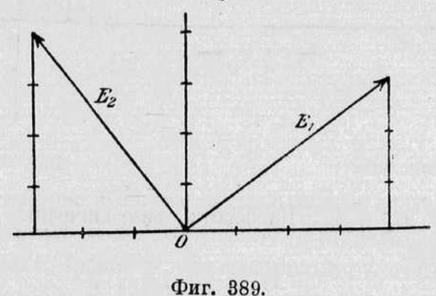
и

$$E_2 = -3 + j \cdot 4.$$

Такъ какъ $(j)^2 = -1$, то отсюда вытекаетъ, что волну E_2 можно получить изъ волны E_1 посредствомъ умноженія ея на j:

$$E_2 = j \cdot E_1 = j \cdot 4 - 3.$$

Такимъ образомъ, умноженіе на j перемѣщаетъ діаметръ волны въ направленіи вращенія вектора OX [1]), и получается волна, которая отстаетъ отъ первоначальной на 90°.



Фиг. 389.

Точно также мы можемъ волну E_1 считать получившейся изъ E_2 отъ умноженія ея на $-j$:

$$E_1 = -j \cdot E_2 = -j(-3 + j \cdot 4)$$

или, такъ какъ $(-j)(+j) = +1$,

то

$$E_1 = 4 + j \cdot 3.$$

Слѣдовательно, умноженіе волны на $-j$ обозначаетъ перемѣщеніе діаметра ея противъ вращенія вектора OX. Получаемъ волну, опережающую первоначальную на 90°.

---

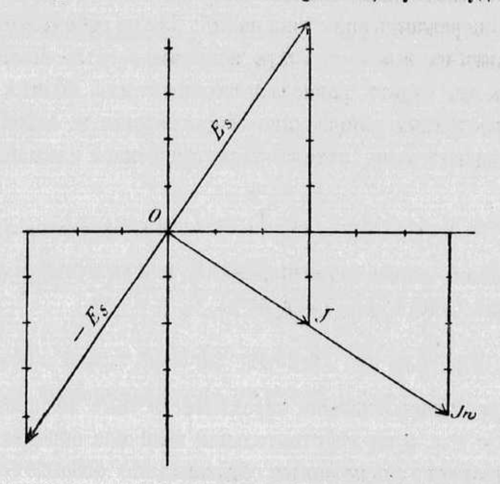
[1]) Мы напомнимъ, что линію временъ OX на фиг. 385 мы заставляли вращаться противъ часовой стрѣлки.

Наконецъ, если у насъ имѣются двѣ волны, разность фазъ у которыхъ составляетъ 180°, то координаты одной волны, взятыя съ обратномъ знакомъ, являются координатами другой волны. Слѣдовательно, умноженіе на -1 сдвигаетъ волну на 180°.

Мы можемъ, теперь, выразить посредствомъ символическаго обозначенія омическое напряженіе и электродвижущую силу самоиндукціи, если у насъ будетъ задана сила тока по своей силѣ и фазѣ. Положимъ, токъ по своей силѣ и фазѣ выражается такимъ образомъ:

$$J = 3 - j \cdot 2.$$

Сопротивленіе пусть будетъ 2 ома, а индуктивное сопротивленіе $L\omega$, которое мы ради простоты обозначимъ черезъ x, пусть будетъ 1,5 ома.



Фиг. 390.

Тогда омическое напряженіе по величинѣ и фазѣ получится просто изъ умноженія уравненія для J на w. Получимъ:

$$J \cdot w = 2 \cdot (3 - j \cdot 2) = 6 - j \cdot 4.$$

Для полученія электродвижущей силы самоиндукціи по величинѣ и фазѣ необходимо уравненіе для J умножить не только на x, но и на j. Этимъ мы достигнемъ того, что опредѣляемая волна будетъ отставать на 90° отъ волны тока; слѣдовательно:

$$E_s = j \cdot x \cdot J$$

или, въ нашемъ случаѣ:

$$E_s = j \cdot 1{,}5(3 - j \cdot 2) = +3 + j \cdot 4{,}5.$$

Фиг. 390 подтверждаетъ полученный результатъ. При этомъ подъ E_s мы разумѣли электродвижущую силу самоиндукціи, которая отчасти противодѣйствуетъ напряженію у зажимовъ. Если мы пожелаемъ имѣть слагающую напряженія у зажимовъ, которая уравновѣшиваетъ самоиндукцію, то должны уравненіе для E_s умножить еще на -1, и тогда будемъ имѣть:

$$-E_s = -3 - j\cdot 4{,}5.$$

4. Послѣдовательное соединеніе индуктивныхъ и омическихъ сопротивленій.

Обыкновенно слагающая напряженія у зажимовъ, уравновѣшивающая самоиндукцію, опережаетъ силу тока на 90°. Для ея опредѣленія мы должны токъ J умножить на x и $-j$. Тогда получимъ: $-j\cdot x\cdot J$. Полное напряженіе у зажимовъ будетъ равнодѣйствующей изъ обоихъ напряженій, идущихъ на преодолѣніе омическаго сопротивленія и самоиндукціи. Эта послѣдняя, слѣдовательно, путемъ геометрическаго сложенія получается равною:

$$E = J\cdot w + (-j\cdot x\cdot J) = J\cdot(w - j\cdot x).$$

Слѣдовательно, полное сопротивленіе Z, или кажущееся сопротивленіе, въ этомъ случаѣ будетъ: $w - j\cdot x$, т. е.

$$Z = w - j\cdot x.$$

Но кажущееся сопротивленіе опредѣляется такъ же, какъ гипотенуза при катетахъ w и x, и ея дѣйствительная величина опредѣлится, согласно Пиѳагоровой теоремѣ, слѣдующимъ образомъ:

$$z = \sqrt{w^2 + (-x)^2}.$$

Слѣдовательно, законъ Ома для перемѣннаго тока представится такимъ образомъ:

въ символической формѣ:

$$J = \frac{E}{Z} = \frac{E}{w - j\cdot x}$$

въ дѣйствительной формѣ:

$$i = \frac{e}{z} = \frac{e}{\sqrt{w^2 + x^2}}$$

Опредѣлимъ, далѣе, напряженіе у зажимовъ генератора, внутреннее омическое сопротивленіе котораго w_0, а внутреннее индуктивное сопротивленіе x_0. Внѣшнее омическое сопротивленіе пусть будетъ w и внѣшнее индуктивное сопротивленіе x. Тогда полное внутреннее сопротивленіе будетъ $Z_0 = w_0 - j\cdot x_0$, а внѣшнее кажущееся сопротивленіе $Z = w - j\cdot x$ (ср. стр. 330). Обозначимъ, теперь, постоянную электродвижущую силу генератора, выраженную въ комплексныхъ величинахъ, черезъ E_0 и напряженіе у зажимовъ, также въ комплексныхъ величинахъ, черезъ E_k, тогда получимъ:

$$J = \frac{E_0}{Z_0 + Z} = \frac{E_0}{w_0 + w - j\cdot(x_0 + x)}$$

и

$$E_k = J\cdot Z = \frac{E_0\cdot Z}{w_0 + w - j\cdot(x_0 + x)}.$$

Перейдемъ, теперь, къ дѣйствительнымъ величинамъ:

$$E_k = \frac{E_0\cdot z}{\sqrt{(w_0+w)^2 + (x_0+x)^2}} = \frac{E_0\cdot z}{\sqrt{w_0^2 + 2w_0\cdot w + w^2 + x_0^2 + 2x\cdot x_0 + x^2}}$$

Если, затѣмъ:

$$w_0^2 + x_0^2 = z_0^2$$

и

$$w^2 + x^2 = z^2,$$

то, согласно этому, имѣемъ:

$$E_k = \frac{E_0\cdot z}{\sqrt{z_0^2 + z^2 + 2\,(w_0\cdot w + x_0\cdot x)}}.$$

Это выраженіе можно было бы получить изъ фиг. 200 на стр. 329 и непосредственно, воспользовавшись теоремой Пиѳагора.

5. Послѣдовательное соединеніе емкости и омическаго сопротивленія.

Въ статьѣ 78 мы уже имѣли, что противоэлектродвижущая сила конденсатора E_c опережаетъ токъ на 90°. Эту противоэлектродвижущую силу мы получимъ, если согласно уравненію на стр. 53, раздѣлимъ силу тока J на $C\omega$ и изъ-за разности фазъ умножимъ на $-j$. Такимъ образомъ имѣемъ:

$$E_c = -j\cdot\frac{J}{C\omega}.$$

Слагающая напряженія у зажимовъ, уравновѣшивающая противодавленіе конденсатора, будетъ $+j\cdot\dfrac{J}{C\omega}$. Отсюда при послѣдовательномъ со-

единеніи емкости и омическаго сопротивленія получаемъ напряженіе у зажимовъ:

$$E = J \cdot w + j \cdot \frac{J}{C\omega} = J \cdot \left(w + j \cdot \frac{1}{C\omega}\right).$$

Слѣдовательно, за кажущееся сопротивленіе цѣпи мы должны принять выраженіе:

$$Z = w + j \cdot \frac{1}{C\omega}.$$

гдѣ w и $\frac{1}{C\omega}$ будутъ прямоугольныя слагающія индуктивнаго сопротивленія Z. Ясно, что дѣйствительное значеніе будетъ:

$$z = \sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2}.$$

Если сравнимъ, теперь, уравненія:

$$Z = w - j \cdot L\omega$$

$$Z = w + j \cdot \frac{1}{C\omega}$$

между собою, то увидимъ, что мы величину $\frac{1}{C\omega}$ можемъ разсматривать какъ отрицательное индуктивное сопротивленіе. Примемъ, слѣдовательно, перпендикулярную къ омическому сопротивленію слагающую кажущагося сопротивленія вообще за реакцію цѣпи x, то тогда будетъ имѣть мѣсто уравненіе:

$$Z = w - j \cdot x,$$

безразлично, будь то для включенной реакціи самого индуктивнаго сопротивленія, или будь то для включенной емкости. Для индуктивнаго сопротивленія или реакціи самоиндукціи $x = L\omega$, а для емкости $x = -\frac{1}{C\omega}$.

Назовемъ величину $\frac{1}{C\omega}$, согласно Steinmetz'у, реакціей емкости.

6. Омическое сопротивленіе, реакціи самоиндукціи и реакція емкости въ послѣдовательной цѣпи.

Уравненіе

$$J = \frac{E}{w - j \cdot x}$$

является теперь общимъ выраженіемъ, если подъ x разумѣть сумму $L\omega - \frac{1}{C\omega}$. Слѣдовательно, мы имѣемъ:

$$J = \frac{E}{w - j \cdot \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)}.$$

Въ дѣйствительныхъ величинахъ тотчасъ же получаемъ:

$$J = \frac{E}{\sqrt{w^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}.$$

Слѣдовательно, теперь имѣетъ мѣсто раньше выведенное общее уравненіе для напряженія у зажимовъ генератора:

$$E_k = \frac{E_0 \cdot z}{\sqrt{z_0^2 + z^2 + 2(w_0 \cdot w + x_0 \cdot x)}}.$$

Это уравненіе указываетъ, что при заданномъ полномъ внѣшнемъ сопротивленіи $z = \sqrt{w^2 + x^2}$ и при заданномъ внутреннемъ кажущемся сопротивленіи генератора, напряженіе у зажимовъ бываетъ равно электродвижущей силѣ. Это получится тогда, когда знаменатель будетъ равенъ Z или когда

$$z_0^2 + 2(w_0 \cdot w + x_0 \cdot x) = 0.$$

Пренебрежемъ небольшимъ внутреннимъ сопротивленіемъ w_0 и положимъ, соотвѣтственно съ этимъ, кажущееся сопротивленіе z_0 равнымъ x_0; тогда получимъ:

$$x_0^2 + 2x \cdot x_0 = 0$$

или

$$x = -\frac{x_0}{2}.$$

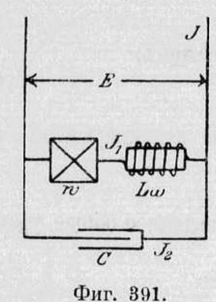
Реакція внѣшней цѣпи, т. е. сумма положительной реакціи самоиндукціи и отрицательной реакціи емкости, должна, слѣдовательно, соста-

влять — $\frac{x_0}{2}$, если напряженіе у зажимовъ должно равняться электродвижущей силѣ.

Если же реакція отъ внѣшней емкости превыситъ еще больше, то знаменатель въ уравненіи для E будетъ меньше Z, и напряженіе у зажимовъ будетъ больше электродвижущей силы (ср. фиг. 256).

7. Реакція самоиндукціи и реакція емкости въ параллельной цѣпи.

На фиг. 391 представленъ случай, въ которомъ конденсаторъ включенъ въ шунтъ къ цѣпи, обладающей индуктивнымъ сопротивленіемъ.



Фиг. 391.

Тогда для врехней вѣтви имѣетъ мѣсто уравненіе:

$$J_1 = \frac{E}{w - j\cdot x}.$$

Такъ какъ токъ въ конденсаторѣ J_2 опережаетъ напряженіе у зажимовъ на 90°, то на основаніи положенія, высказаннаго на стр. 604,

$$J_2 = -j\cdot C\omega\cdot E.$$

Полный токъ J тогда будетъ:

$$J = J_1 + J_2 = \frac{E}{w - j\cdot x} - j\cdot C\omega\cdot E.$$

Вынесемъ затѣмъ E за скобки и, для уничтоженія въ знаменателѣ комплексныхъ величинъ, умножимъ числитель и знаменатель на $w + j\cdot x$. Тогда получимъ:

$$J = E\cdot\left\{\frac{w + j\cdot x}{w^2 + x^2} - j\cdot C\omega\right\}$$

или

$$J = E\cdot\left[\frac{w}{w^2 + x^2} + j\cdot\left(\frac{x}{w^2 + x^2} - C\omega\right)\right] \quad . \; . \; . \; . \; (a)$$

Возвратимся, теперь, снова къ дѣйствительнымъ величинамъ; тогда вмѣсто простого сложенія, заключеннаго большими скобками, мы должны произвести сложеніе согласно Пиѳагоровой теоремѣ, и получимъ:

$$J = E\cdot\sqrt{\left(\frac{w}{w^2 + x^2}\right)^2 + \left(\frac{x}{w^2 + x^2} - C\omega\right)^2}.$$

Если, напримѣръ, главный токъ долженъ имѣть одинаковую фазу съ напряженіемъ у зажимовъ E, то они отличаются одно отъ другого только вещественнымъ множителемъ, и мнимая величина въ уравненіи (a) равна нулю. Поэтому мы получаемъ условіе:

$$C\omega = \frac{x}{w^2 + x^2}.$$

Въ это уравненіе кромѣ реакціи самоиндукціи x входитъ w. Такимъ образомъ, отсюда видно, что хотя путемъ включенія емкости въ шунтъ и можетъ быть достигнуто полное уравновѣшеніе безваттнаго тока, но при измѣненіи сопротивленія w снова наступаетъ сдвигъ фазъ.

8. Кажущаяся проводимость, проводимость ваттнаго тока и проводимость безваттнаго тока.

Еще на стр. 17 мы указывали, что въ нѣкоторыхъ случаяхъ всѣ расчеты скорѣе и удобнѣе вести при помощи проводимости, чѣмъ при помощи сопротивленія. Когда мы опредѣляли сопротивленіе нѣсколькихъ параллельно включенныхъ вѣтвей, мы получили слѣдующій результатъ:

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3} \dots$$

Это уравненіе представляетъ собою зависимость между проводимостями. Примѣнимъ тотъ же путь расчета и при символическомъ методѣ. Для этого назовемъ, согласно Steinmetz'у, величину, обратную кажущемуся сопротивленію, кажущеюся проводимостью и обозначимъ ее буквою Y; тогда имѣемъ:

$$Y = \frac{1}{Z}, \qquad y = \frac{1}{z}.$$

Отсюда получаемъ:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{w - j\cdot x} = \frac{w + j\cdot x}{w^2 + x^2} = \frac{w}{w^2 + x^2} + \frac{j\cdot x}{w^2 + x^2}.$$

Кажущаяся проводимость также состоитъ изъ вещественной части и мнимой. Назовемъ вещественную часть проводимостью ваттнаго тока и обозначимъ ее буквою g. Равнымъ образомъ, мнимую часть назовемъ проводимостью безваттнаго тока и обозначимъ ее буквою b. Тогда имѣемъ:

$$g = \frac{w}{w^2 + x^2} = \frac{w}{z^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (a)$$

$$b = \frac{x}{w^2 + x^2} = \frac{x}{z^2} \quad . \quad . \quad .$$

$$Y = g + j \cdot b.$$

Законъ Ома тогда гласитъ:

$$J = \frac{E}{Z} = E \cdot Y$$

или

$$J = E \cdot (g + j \cdot b).$$

Абсолютное значеніе кажущейся проводимости, — понятно, снова на основаніи Пиѳагоровой теоремы,—будетъ:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{\frac{w^2}{z^4} + \frac{x^2}{z^4}}$$

или, такъ какъ $w^2 + x^2 = z^2$, то

$$y = \sqrt{\frac{1}{z^2}} = \frac{1}{\sqrt{w^2 + x^2}}.$$

Для указанія примѣненія этого уравненія, опредѣлимъ опять, при какихъ условіяхъ включенный на фиг. 391 въ шунтъ конденсаторъ сдѣлаетъ сдвигъ фазы въ главномъ проводѣ равнымъ нулю. Въ этомъ случаѣ мнимая часть въ уравненіи

$$J = E \cdot (g + j \cdot b). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (c)$$

должна равняться нулю.

Кажущаяся проводимость верхней цѣпи фиг. 391, если мы ради ясности обозначимъ реакцію самоиндукціи черезъ x_1, согласно уравненію (b), будетъ:

$$b_1 = \frac{x_1}{z_2} = \frac{x}{x_1^{\,2} + w_1^{\,2}}.$$

Равнымъ образомъ, кажущаяся проводимость нижней цѣпи, согласно уравненію (b),—если мы при этомъ положимъ $x = -1/C\omega$ и $w = 0$,—будетъ равна:

$$b_2 = -C\omega.$$

Слѣдовательно, общая кажущаяся проводимость обѣихъ вѣтвей получается:

$$b = b_1 + b_2 = \frac{x}{x_1^{\,2} + w_1^{\,2}} - C\omega.$$

Если сдвигъ фазъ въ главномъ проводѣ долженъ быть равнымъ нулю, то E и J отличаются только вещественнымъ множителемъ, и потому b въ уравненіи (c) должно быть равнымъ нулю. Отсюда получаемъ прежнее условіе:

$$C\omega = \frac{x_1}{w_1^{\,2} + x_1^{\,2}}.$$

Слѣдуетъ замѣтить:

1 что проводимость ваттнаго тока и проводимость безваттнаго тока отдѣльныхъ вѣтвей не являются величинами обратными сопротивленія или реакціи самоиндукціи, а выражаются посредствомъ уравненій:

$$g = \frac{w}{z^2} \qquad \text{и} \qquad b = \frac{x}{z^2}.$$

2. что сопротивленіе, а равно и реакція всей цѣпи не являются суммами отдѣльныхъ сопротивленій или отдѣльныхъ реакцій цѣпи.

Такимъ образомъ, для опредѣленія въ вышеуказанномъ примѣрѣ величины b нельзя уравненіе $b = \frac{x}{w^2 + x^2}$ приложить ко всей цѣпи и подставить въ него затѣмъ вмѣсто x сумму реакцій внѣшнихъ цѣпей; напротивъ, мы должны опредѣлить проводимости безваттнаго тока b_1 и b_2 для каждой отдѣльной вѣтви и затѣмъ сложить обѣ эти величины.

Предметный указатель.

ЗАМѢЧЕННЫЯ ОПЕЧАТКИ.

					Напечатано.	*Слѣдуетъ.*
Стр.	3	18	строка	сверху	t	$\boldsymbol{t}$
»	77	14	»	»	E	$\boldsymbol{E}$
»	122	5	»	»	такъ что	и потому
»	199	3	»	снизу	длл	для
»	263	18	»	сверху	$M_d \cdot \omega$	$M_d \cdot \boldsymbol{\omega}$
»	263	21	»	»	$M_d \cdot \omega$	$M_d \cdot \boldsymbol{\omega}$
»	306	7	»	»	редняя	средняя
»	311	5	»	»	круга	у круга
»	319	8	»	снизу	(49)	(48)
»	324	5	»	сверху	какимъ образомъ	какъ
»	327	16	»	»	(40)	(50)
»	327	22	»	»	(40)	(50)
»	339	23	»	»	такъ что	такимъ образомъ
»	342	23	»	»	и омическое сопротивленіе	и омическаго сопротивленія
»	344	2	»	»	$L \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot i_s$	$E \cdot \boldsymbol{\omega} i \cdot$
»	347	6	»	»	$i/C \cdot \boldsymbol{\omega}$	$1/C \cdot \boldsymbol{\omega}$
»	350	3	»	»	стр. 320	стр. 319
»	350	21	»	»	стр. 320	стр. 319
»	351	11	»	»	стр. 320	стр. 319
»	352	5	»	»	стр. 329	стр. 319
»	357	6	»	снизу	безиндукціонной	безъиндукціонной
»	385	8	»	сверху	$\sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \cdot E_{max}$	$E = \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \cdot E_{max}$
»	397				На фиг. 257a пропущена буква G, необходимая при пересѣченіи OG и BG; на той же фигурѣ напечатано $L_a \cdot wi$ и $L \cdot w \cdot i$ надо $L_a \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot i$ и $L \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot i$. На фиг. 257b пропущена буква B, необходимая при пересѣченіи $\boldsymbol{N}_1$ и $\boldsymbol{N}$.	
»	479	6	»	снизу	фиг. 309 стр. 167	фиг. 189b стр. 460
»	488	12	»	»	фиг. 115	фиг. 315
»	492	6	»	сверху	X^{max}	X_{max}
»	502	11	»	снизу	процентъ потерь	процентныя потери
»	»	»	»	»	проценту скольженія	процентному скольженію
»	503	6	»	сверху	процентъ потери	процентныя потери
»	»	8	»	»	проценту потери	процентной потерѣ
»	521	16	»	»	процентъ скольженія	процентное скольженіе

